

## **LAS RAICES DE LA VIDA**

Genes, células y evolución

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5

LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

SALVAT

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**



**LAS RAICES  
DE LA VIDA**

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

**Genes, células y evolución**

**SALVAT**

Versión española de la obra original norteamericana: *The roots of life* de Mahlon B. Hoagland, publicada por Houghton Mifflin Company de Boston

Traducción: Josep Cuello

*Para Olley*

© 1985 Salvat Editores, S.A., Barcelona

© Mahlon B. Hoagland

ISBN 0-395-25811-1 Edición original

ISBN 84-345-8246-5 (Obra completa)

ISBN 84-345-8368-2

Depósito legal NA-1121-1985.

Publicado por Salvat Editores, S.A., Mallorca, 41-49 - Barcelona

Impreso por Gráficas Estella. Estella (Navarra)

Printed in Spain



# Prefacio

Me considero muy afortunado por haber participado de manera activa en los recientes y sensacionales descubrimientos de la biología moderna, que han conducido al conocimiento que actualmente tenemos de las leyes que rigen los procesos vitales. La sencillez y la belleza de esas verdades que se nos han hecho patentes constituyen para mí una fuente de goce y admiración. Al enseñar dichas leyes a los estudiantes de medicina y al explicarlas a mis amigos me he convencido de que muchas personas pueden compartir ese goce, incluso aquellas que carecen de formación científica. Mi mujer —a la cual dedico este libro— ha sido una partidaria entusiasta de este aspecto. Con toda seguridad, su insistencia acerca de que los científicos tienen la obligación de abrir este mundo a los profanos ha tenido decisiva influencia en la motivación y desarrollo de esta obra.

Hasta el presente siglo, los científicos solían trabajar como investigadores independientes, favorecidos por monarcas benefactores o por patrocinadores generosos, en algunas ocasiones por sus gobiernos y, a veces, a costa de sus propios y modestos patrimonios. Se han incrementado las expectativas puestas en ello así como la complejidad y el coste de la tecnología científica, lo cual ha colocado a los científicos en una



relación mucho más estrecha con los gobiernos y el pueblo. En la medida en que aumentan los conocimientos y se hacen más oportunos y susceptibles de aplicación, todo el mundo quiere saber qué hacen los científicos. ¿Cumplen con lo que se espera de ellos? ¿Emprenden acciones que no deberían realizar? Así, por ejemplo, sería lógico proponer que se les retiraran las ayudas gubernamentales cuando se considera la ciencia como algo que defrauda, amedrenta o no satisface los esfuerzos que se habían puesto en ella, mientras que en otros casos, después de un minucioso estudio, se juzgarían adecuadas tales subvenciones. Más a menudo, sin embargo, dicha acción se parecerá más a la exploración de las profundidades de una cueva desconocida, isin olvidar, como es obvio, que todos andamos a tientas en la cueva! La dirección razonable de tales problemas necesita con urgencia, que tanto los ciudadanos como sus representantes genuinos sepan qué es la ciencia médica, qué puede llegar a ser y lo que no debe ser.

He tenido en cuenta estas consideraciones generales al redactar este libro. Otro motivo ha estribado en el acicate implícito en la convicción de la mayoría de los profanos en que la ciencia es incomprensible por su propia naturaleza, abstrusa y misteriosa; justo es reconocer, sin embargo, que la aversión de muchísimos científicos a adecuar su lenguaje a la comprensión del lego sea un factor de mayor importancia en el desencanto del ciudadano sin formación científica. Pero, la prevención ante la ciencia no es, seguramente, un estado natural de la mente. La ciencia es la búsqueda natural de explicaciones en nosotros mismos y en cuanto nos rodea. Es el proceso de hacer comprensible, mediante el descubrimiento y la explicación por leyes sencillas, de lo que ha sido un oscuro —y a menudo atemorizador— misterio. Somos de natural curiosos, y esta curiosidad es, a buen seguro, una de las fuerzas motivadoras humanas más elementales. Como los niños, nos dedicamos a un tipo de ciencia para ejercitar libremente y sin

trabas nuestra curiosidad. Con la edad perdemos aquello que nos ha proporcionado tantas alegrías y conocimientos.

Mi razón final para contar lo que antecede está relacionada con mi cargo de presidente y de director científico de un instituto de investigación biomédica fundamental, el Worcester Foundation for Experimental Biology. Mis días están llenos de *déjà vu* en la medida en que mis colegas más jóvenes me reavivan la emoción, el goce y el sentido de progreso que hay en la investigación fundamental. Este libro ensalza tanto los logros del pasado como el compromiso de una nueva generación en la ampliación de las fronteras de nuestros conocimientos como un continuo. Y los generosos amigos de la fundación que han trabajado con tanta dedicación conmigo para crear un magnífico ambiente para proseguir nuestra tarea son los destinatarios de esta expresión tangible de mi aprecio por su calidad moral y por su ayuda material.

Estoy agradecido a Paul C. Zamecnik y a Bernard D. Davis que me ayudaron a encontrar satisfacción y estímulo en la biología molecular; a mi mujer, Olley, pues sin su constante confianza en el valor de esta empresa, no la habría llevado a término; a Jacqueline Foss, que transcribió con agrado y habilidad diversos borradores de esta obra; a Debra Grega, por haber alegrado con sus rotulaciones a mano mis toscas ilustraciones, así como a David y a Ann Barlow, Clarence Berger, Polly Cowan, Winifred Chrisman, Judith Hauck, Hudson Hoagland, Jennifer y Bill Mason, Judith Pederson y Violeta Scornik por su ayuda en la corrección del original.

MAHLON B. HOAGLAND



# Índice de capítulos

1. La sencillez es el signo de la verdad.....	1
2. Información.....	13
3. Inicios.....	33
4. Energía.....	45
5. Cambio.....	61
6. Selección .....	81
7. Embriogénesis .....	97
8. Cáncer .....	121
9. Investigación.....	139
Glosario .....	163



# **LAS RAICES DE LA VIDA**



# 1. La sencillez es el signo de la verdad

Recuerdo, de cuando era joven, un paseo con mi padre por una playa desierta. El mar estaba gris, nubes rasgadas se deslizaban a merced de un viento frío de principios de invierno. Fue un día de descubrimientos. Recostadas sobre la arena, entre los restos de algas acumulados en el límite de la pleamar, había viejas botellas vacías, de toda suerte de formas y tamaños. De pronto nos dimos cuenta de que las botellas estaban tapadas, y por más que buscamos no pudimos encontrar ninguna destapada. Quedamos asombrados por aquella insólita uniformidad hasta que mi padre dio con la explicación. Con deleite, me estimuló a encontrar en esa característica de las botellas un significado profundo, y así aprendí una lección de evolución que quedó firmemente grabada en mi mente para toda la vida. Porque, obviamente, aquellas botellas eran los escasos supervivientes de una travesía oceánica. De las muchas botellas vacías arrojadas al mar por el hombre, muy pocas habían sido tapadas por algún acto inadvertido, fortuito, y eso las había convertido en insumergibles. Las no supervivientes, inermes sin tapón frente al hostil océano, se habrían hundido en seguida.

En ciencia, el acto creativo es un poco como la intuición sobre las botellas de mi juventud. Es la concepción de una simple ley o explicación que pone orden en un cúmulo de he-



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

chos embarullados y aparentemente sin sentido. Es lo que hicieron Charles Darwin y Alfred Russell Wallace hace más de cien años cuando, cada uno por su cuenta, trataron de buscar una explicación a la supuestamente caótica distribución y diversidad de los seres vivos sobre la Tierra. Sus magníficos y sencillos conceptos de la variabilidad entre los individuos de una especie y de la supervivencia del más apto constituyen una brillante muestra de imaginación. Su inspirada explicación hizo simple y comprensible una vasta acumulación de datos biológicos.

Sin embargo, la percepción inspirada es inútil sin una meticulosa observación. Y la meticulosa observación es pedante si el investigador no sabe cómo establecer hipótesis acerca de las observaciones y, posteriormente, verificar dichas hipótesis por medio de la experimentación. Si las hipótesis son buenas y los experimentos están bien planificados, las respuestas probablemente revelarán cosas desconocidas hasta entonces.

Las cuestiones muy generales, planteadas por las religiones y por los filósofos, conducen a respuestas igualmente vagas, raramente verificables y por ello no aceptadas de forma universal. Las preguntas directas y concisas formuladas por los científicos a la naturaleza tienden a proporcionar respuestas inequívocas y sencillas, que otros pueden confirmar. El conocimiento científico se edifica de este modo desde la base, con pocas piezas cada vez, y cada una de ellas constituye un soporte seguro por cuanto es verdadera, es decir, verificable universalmente. Estoy definiendo la verdad en términos aceptables para el científico, y se podrá argüir que la experiencia humana revela otras clases de verdad; sin embargo, esas otras clases no son verificables, de modo que, si bien para unos son ciertas, para otros se trata sólo de opiniones.

En este libro se consideran los principios elementales que rigen el estado y los procesos de la materia viva. Dichos prin-

cipios iluminan toda la biología y la medicina, y nos facilitan comprender el significado de lo vivo en todas sus aparentemente complicadas ramificaciones. Y, además, producen un goce estético. *Simplex sigillum veri*, decían los romanos: «La sencillez es el signo de la verdad.»

## FIJÁNDONOS EN LA CÉLULA

Si queremos estudiar los rasgos más elementales y verdaderos de la vida debemos empezar por la célula, por ser ésta la mínima estructura organizadora de la vida en todas sus formas. *No hay nada vivo más sencillo que una célula y nada puede llegar a ser más complejo sin comenzar por ser una célula.*

Permítaseme justificar este importante aserto diseccionando imaginadamente su cuerpo, querido lector, hasta dar con la esencia de su vida, con el irreducible componente del que está formado y que es común a todas las criaturas vivientes.

1. El lector tiene conciencia de sí mismo, de cuanto le rodea, de lo que hace, incluso del hecho de que está leyendo este libro. La conciencia es la actividad de un órgano muy especial, el cerebro, y es un fenómeno biológico casi tan complicado como la misma existencia. Apenas sabemos nada acerca de qué modo nos damos cuenta de nuestros actos y probablemente continuaremos así durante largo tiempo, si es que llegamos a saberlo, pero sospechamos que la mayoría de los seres vivos no tienen conciencia de su existencia.

2. Su cuerpo es una comunidad de órganos —cerebro, corazón, pulmones, hígado, riñones, músculos, huesos, piel, glándulas endocrinas— que actúan conjuntamente en una armonía finamente regulada. Su temperatura corporal no se aleja normalmente de los 37 °C. Su cerebro, sus nervios y sus



músculos coordinan sus movimientos y lo mantienen en perfecto equilibrio; mediante un gasto controlado de alimentos y oxígeno y la eliminación de los residuos, su peso total se mantiene constante. Casi todos los demás mamíferos, así como los demás vertebrados, también poseen la mayor parte de estas superlativas capacidades de coordinación. Pero, por otro lado, casi todas las formas vivientes se las arreglan bastante bien sin ellas.

3. Cada uno de los órganos de su cuerpo está formado por numerosos grupos de células, con sus rasgos peculiares. Las células cerebrales, largas y filamentosas, se dedican a la conducción de estímulos eléctricos; las células epiteliales, flexibles y elásticas, actúan como una cubierta protectora de su cuerpo; las células óseas acumulan a su alrededor fosfato de calcio para adquirir rigidez y así poder sostener su cuerpo, y así sucesivamente. De modo parecido a lo que ocurre con las abejas obreras o las hormigas soldado, a las células especializadas se les confía la realización de un número limitado de funciones en servicio de un todo mayor. La importantísima misión de toda persona de reproducirse en su hijo ha sido confiada a unas células particulares de su cuerpo. La especialización celular está muy extendida en los seres vivos. Sin embargo, existen seres vivos formados por una sola célula, que no se asocian con otras células, conservan una remarcable adaptabilidad y permanecen independientes y capaces de autorreproducirse y de satisfacer sus necesidades nutritivas a partir de sustancias muy simples.

4. No hace mucho tiempo, las células del propio cuerpo del lector eran autónomas y considerablemente adaptables, y se autoduplicaban libremente, igual que las formas vivientes más simples. Esto sucedía cuando empezaban a asentarse en la pared del útero de su madre. El lector no se reconocería en ellas, pero cada célula contenía toda la información necesaria para su desarrollo.

Este camino que el lector recorrió en sus comienzos dentro de su madre pone de relieve su parentesco con todos los demás seres vivos. Sus comienzos en la vida tienen un especial significado para nuestras investigaciones en el presente libro, pues corroboran que *todo ser vivo, desde el más simple al más complicado, ha estado o está constituido por una sola célula capaz de dividirse para producir más copias de sí misma*. Y en esta afirmación se incluyen los seres vivos «superiores» formados por muchas células, pues han de fabricar células simples (óvulos y espermatozoides) cuando han de realizar copias de sí mismos. La mayor diferencia entre las células de los distintos organismos se encuentra en la «información» que contienen y que instruye a su maquinaria interna para realizar una bacteria, un mosquito, una rana o un hombre.

## ¿DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS CÉLULAS?

Nuestra atención está centrada en la célula como la unidad más sencilla y pequeña de los seres que presenta la propiedad de la vida. Asegurémonos, por tanto, de que tenemos una clara idea acerca de los materiales con que está construida una célula. Seguidamente, se relacionan por orden creciente de complejidad:

1. *Átomos*. Son los elementos naturales del Universo y constituyen las entidades más pequeñas de las que está construida la vida. Las cinco clases principales de átomos de los que estamos hechos son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo. Hay también otras muchas clases, pero en cantidades mucho más pequeñas. Las cinco clases principales de átomos de la vida tienen una masa media de 15 unidades de masa atómica (recordémoslo para compararla con la de las moléculas).



2. *Moléculas.* Son combinaciones de átomos. Las moléculas de las células son a menudo denominadas moléculas orgánicas. Podemos considerar dos clases: las moléculas «sencillas» y las cadenas moleculares.

Las moléculas sencillas tienen por término medio una masa de 150, es decir, son unas diez veces más pesadas que los átomos celulares. Existen centenares de clases distintas de moléculas sencillas en las células.

Las cadenas moleculares, como su nombre indica, están formadas por largas cadenas de moléculas sencillas unidas unas a otras. La masa media de estas cadenas es de unas 75.000 unidades de masa atómica, es decir, unas quinientas veces más pesada que las moléculas sencillas y cinco mil veces más pesada que los átomos. Las cadenas moleculares más largas tienen una masa de varios millones de unidades atómicas y pueden verse con los microscopios electrónicos más potentes.

3. *Estructuras celulares.* Se trata de conjuntos formados por cadenas de moléculas ordenadas arquitectónicamente. La estructura celular más pequeña tiene una masa de unas 7.500.000 unidades de masa atómica, o sea, unas cien veces mayor que el promedio de las cadenas moleculares. Las estructuras más grandes son diez veces más pesadas, o incluso más. Las estructuras celulares pueden observarse con los microscopios ópticos corrientes.

4. *Células.* Son, como hemos dicho, las organizaciones o estructuras más pequeñas con vida propia. La mayoría de las células son demasiado pequeñas para ser observadas a simple vista, pero pueden distinguirse fácilmente con un microscopio ordinario o incluso con una lupa.

Las células se reúnen para formar organismos, es decir, estructuras organizadas capaces de llevar una vida autónoma. Una bacteria o una levadura es un organismo, pues la única

célula de que consta es capaz de realizar todas las funciones de la vida. Pero muchos otros organismos, los pluricelulares, están formados por gran cantidad de células (el cuerpo humano, por ejemplo, consta de isesenta billones!). Las células de los organismos multicelulares están organizadas en grupos que trabajan coordinadamente y desempeñan funciones especializadas. Dichos grupos de células reciben el nombre de órganos.

## ORDEN EN EL CAOS

Juntar átomos para construir moléculas, conectar moléculas para elaborar cadenas, alinear cadenas para armar estructuras y colocar estructuras para producir células vivas es una colosal tarea organizadora, mayor que cualquiera de las que puedan conseguir los humanos con sus cerebros, sus manos y sus ordenadores. Y, sin embargo, esta tarea increíble está siendo realizada sin parar en la Tierra. En la verdadera raíz de la vida se encuentra la constante dedicación de la célula viva a la tarea de crear y mantener orden, organización y complejidad.

Los físicos afirman que el Universo inanimado camina firmemente hacia una mayor desorganización; que se encamina lentamente —en una escala de tiempo de miles de millones de años— hacia el caos. La segunda ley de la termodinámica dice que la entropía —el término científico para designar el desorden— crece invariablemente en cualquier lugar del Universo.

¿Por qué el Universo «aspira» a la desorganización? No resulta tan extraño como parece al principio. Fijémonos en el siguiente ejemplo. Supóngase que se dispone de un poco de pintura azul y algo de pintura amarilla y que se vierten ambas en un mismo recipiente. Las moléculas de pintura chocarán y se mezclarán entre sí, hasta que finalmente se formará una



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

mezcla verde uniforme. Las moléculas habrán alcanzado una distribución completamente al azar, desorganizada, que es la configuración más estable. Si se desea forzar al sistema hacia atrás hasta conseguir una mezcla informe, organizada de moléculas azules y amarillas separadas —las azules arriba y las amarillas abajo, pongamos por caso— se tendrá que actuar contra el fuerte «deseo» del sistema de alcanzar el estado estable, desorganizado y aleatorio de la mezcla verde.

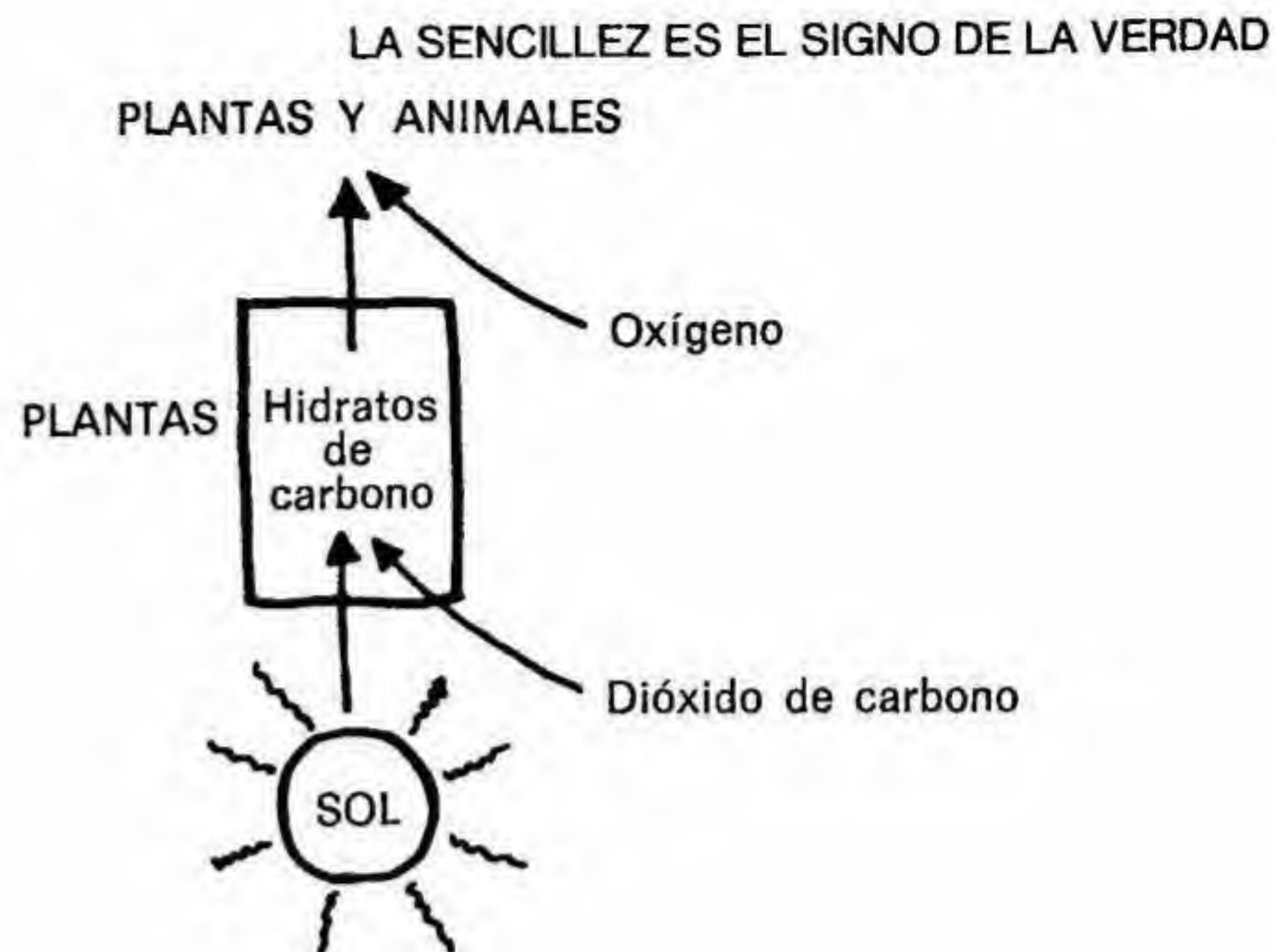
Lo mismo sucede con todos los átomos y moléculas del Universo. Buscan el reposo del desorden total, de la estabilidad última. Los castillos de arena son evanescentes, y están destinados fatalmente a convertirse en montones de arena aplanados y sin forma. Los volcanes nos hablan de la tumultuosa búsqueda terrestre de la estabilidad que confiere la igualdad. Todas las cosas se mueven inexorablemente hacia el desorden, que para todos los átomos y moléculas del Universo constituye la estabilidad final.

Ahora bien, la estrategia de la vida es afrontar esta tendencia de la naturaleza hacia el azar. La vida trabaja constantemente para crear estados inestables, actúa contra el azar, crea orden. La vida realiza regularmente procesos equivalentes a la separación de la pintura verde, y a una escala inmensamente mayor.

## LA ENERGÍA ES NECESARIA PARA GENERAR EL ORDEN

Un proceso que actúa constantemente contra la tendencia natural al desorden sólo puede alcanzar el éxito si recibe ayuda en forma de energía.

La construcción del elegante y maravillosamente complejo interior de una diminuta célula requiere energía. Dicha energía procede del Sol.



Las plantas captan la luz solar. Utilizan la luz captada para convertir el dióxido de carbono en hidratos de carbono (concretamente, en el azúcar glucosa). Los hidratos de carbono son más complejos que el dióxido de carbono, es decir, sus átomos están más ordenados. O sea, la luz solar crea orden al poner en marcha la máquina de fabricar hidratos de carbono, que son un alimento universal para todas las criaturas vivientes, puesto que contienen enlaces químicos ricos en energía. Las plantas y los animales rompen dichos enlaces al «quemar» los hidratos de carbono con oxígeno, y se desprende dióxido de carbono en el proceso. Las plantas y los animales emplean la energía así producida para construir su propia sustancia (todas las complejas estructuras de las células vivas). El orden de una célula viva es muchísimos miles de veces mayor que el orden de una molécula de hidratos de carbono, de modo que los seres vivos deben consumir muchísimos miles de moléculas de hidrato de carbono para autofabricarse.

Vivir, en consecuencia, no sólo implica orden, organización y complejidad; comporta principalmente la capacidad de



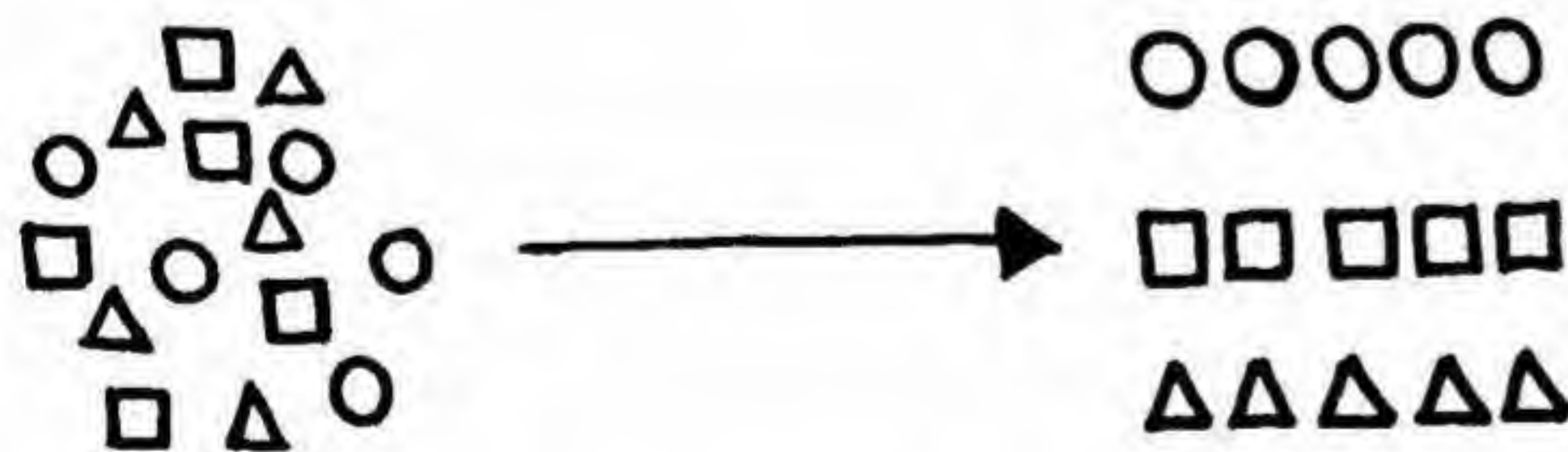
## LAS RAÍCES DE LA VIDA

crear y mantener el orden y la organización en un ambiente hostil. En este sentido, la creación de una nueva vida tiene la cualidad de un milagro.

## ES NECESARIO UN PLAN PARA GENERAR ORDEN

¿Es realmente la vida la única cosa en el Universo que genera orden? El agua, cuando se enfría, se solidifica, y las moléculas de hielo se disponen según elaborados y complicadamente bellos diseños. Una sal en disolución cristaliza cuando el agua se evapora, y este proceso aumenta el orden de las moléculas de sal. Hay otros muchos ejemplos aislados en la naturaleza, pero, en realidad, todos tienen muy poca importancia comparados con los logros de la más sencilla célula viva. Además, la creación de orden por la célula viva es fundamentalmente distinta de la de los procesos de cristalización. Las células establecen orden porque siguen un plan preexistente.

Es razonable suponer que antes de que puedan ordenarse en el espacio un conjunto de cosas ha de existir un plan. En algún sitio debe de existir una «preconcepción» del orden anticipado de las partes. Veamos un ejemplo.



Si se quiere que los cuadrados, los círculos y los triángulos de la izquierda del dibujo no se dispongan al azar sino según un orden —por ejemplo el indicado a la derecha—, algo o

alguien ha de haber concebido previamente dicha ordenación. Dado el plan, la tarea, teóricamente, puede hacerse. Todo cuanto se requiere es energía, tal como ya hemos visto.

¿Cuál es la naturaleza de la información que instruye a la célula acerca de cómo disponer sus átomos, moléculas, cadenas y estructuras en la forma correcta para convertirse en una célula viva completa y que puede transmitirse de generación en generación para volver a iniciar el proceso? Me parece pasmoso que el ser humano haya encontrado la respuesta, que, por cierto, es maravillosamente clara y simple. El descubrimiento de la naturaleza de la información biológica es, a buen seguro, el más impresionante de la moderna biología y uno de los acontecimientos más importantes de toda la historia de la ciencia. De ello trataremos en el siguiente capítulo.



## 2. Información

Nos vemos en los rostros de nuestros hijos como en un espejo. Nuestros hijos son nuestra reencarnación. Les proporcionamos, por medio del espermatozoide y del óvulo, información detallada sobre nuestra constitución física, que las células de nuestros hijos utilizan para construirse a nuestra imagen. Tales instrucciones son nuestro legado al futuro, un legado de información.

La información para construir una célula debe tener la calidad de un mapa, de un plano, o ser como un folleto, un manual, un libro. Debe contener las instrucciones completas susceptibles de ser «comprendidas» por un agente o máquina capaz de realizar la construcción señalada: edificar la vida.

### GENES

La genética enseña que cada rasgo o carácter (por ejemplo, el color de los ojos) de un ser vivo es heredado, es decir, se reproduce meticulosamente en la descendencia. La información que determina rasgos individuales reside en entidades especiales, los genes. Para cada carácter heredado diferente hay un gen distinto. Gregor Mendel, el fundador de la genética, mostró, hacia 1860, que los genes se heredan como si fue-



ran cosas reales; es decir, no se diluyen, ni subdividen ni mezclan durante la herencia. Los genes son, por tanto, como paquetes pequeños de información heredables, y cada uno de ellos gobierna un rasgo particular de un organismo.

En el decenio de 1920, el gran genetista Thomas Hunt Morgan descubrió que los genes se hallan localizados en las células. En el interior de todas hay un recipiente, el núcleo, que se consideraba muy importante por cuanto antes de que la célula se divida él también lo hace en dos; de modo que el proceso de repartir de manera equitativa la riqueza entre la descendencia comienza por el núcleo. Con el microscopio se habían visto en el interior del núcleo estructuras filamentosas, los cromosomas, que se autoduplican antes que el núcleo se divida y, así, a cada célula «hija» le corresponde un juego de cromosomas. Debido a todo ello se sospechaba que los genes se asentaban en los cromosomas. Morgan demostró que, en efecto, era así mediante una serie de refinados experimentos, en los cuales utilizó moscas de la fruta como «animales» de laboratorio. Antes completó su gran obra probando que los genes se alinean, como cuentas, a lo largo del filamento cromosómico.

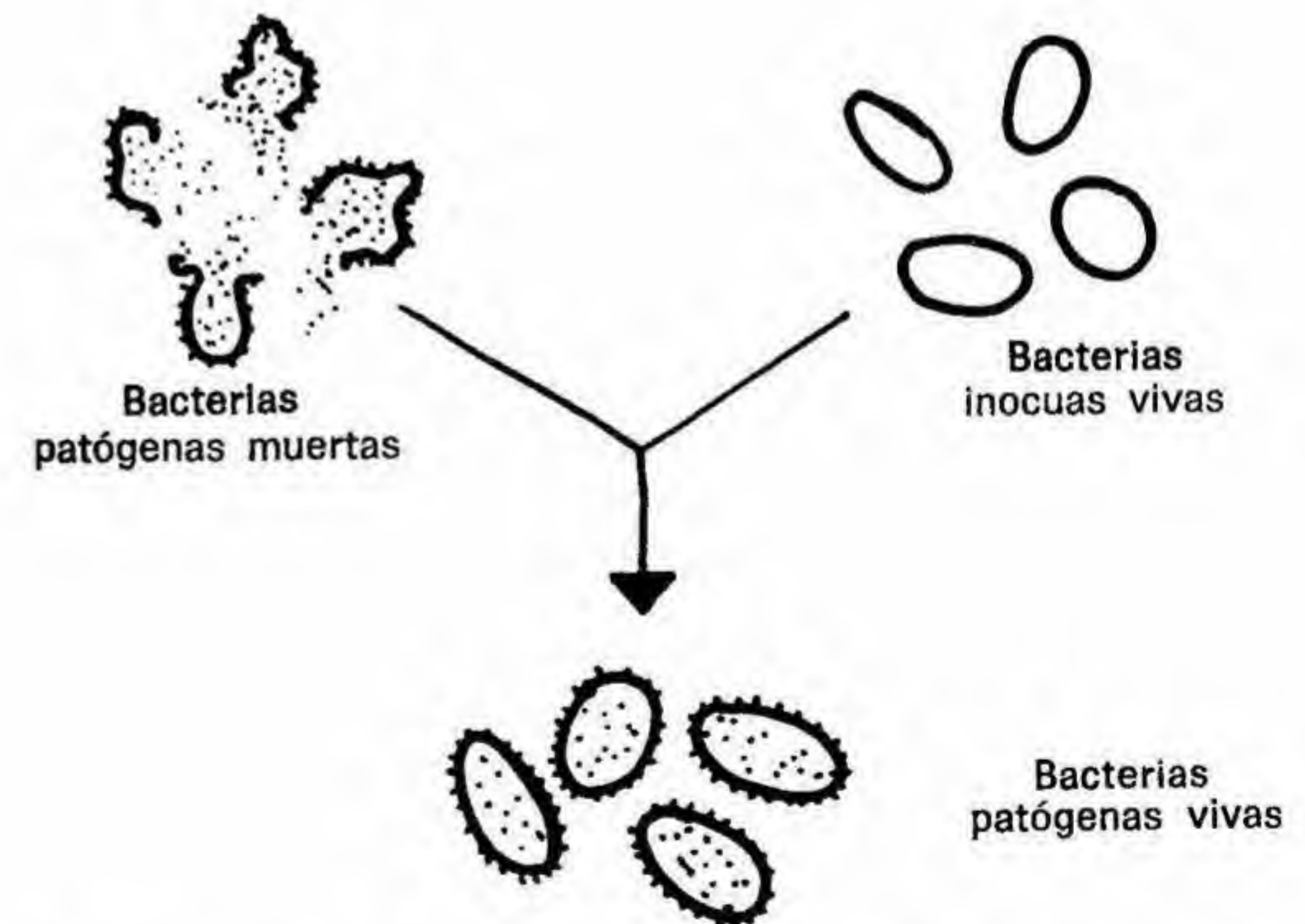
## ¿DE QUÉ SE COMPONEN LOS GENES?

Esto se supo en el decenio de 1930; algunos científicos contestaron a esta interesante pregunta: ¿De qué se componen los cromosomas (genes)?

Los experimentos del biólogo Oswald Avery, sin duda de los más significativos en biología, dieron una brillante y clara respuesta a dicha pregunta, e iniciaron la era moderna de la llamada biología molecular. Por los años de 1940, Avery se interesó por las bacterias que producen la neumonía «doble», la principal causa de muerte antes de la introducción de la

penicilina. Buscaba una explicación para la sugestiva observación de que las bacterias responsables de la neumonía ya muertas podían transmitir su capacidad de producirla a determinadas bacterias vivas que se hallaban próximas a ellas pero no causantes, por sí mismas, de la neumonía. O sea, las bacterias perjudiciales muertas conseguían que bacterias inocuas vivas se volvieran dañinas. Y una vez ocurrida la transformación ésta resultaba permanente y se heredaba, generación tras generación, en la descendencia de la antes bacteria inofensiva.

La capacidad de causar la enfermedad era un carácter genético, o un grupo de caracteres, controlados por genes y heredados como tales. Avery razonaba que, al desintegrarse las bacterias muertas, sus cuerpos liberaban materiales con información química, que eran consumidos por las bacterias vivas.



De esta manera los genes entraban en las bacterias vivas y, en consecuencia, determinaban su heredabilidad. Avery y



sus colaboradores lograron identificar de forma inequívoca este material genético.

Difícilmente cabría imaginar un problema más importante para la medicina: descubrir la identidad química de los genes. Pero no se trataba de un problema que se había de estudiar en el hombre ni probablemente tampoco en los animales. Aquellas bacterias causantes de la neumonía proporcionaron a Avery un sistema ideal. Sus trabajos constituyen un excelente ejemplo del valor de un buen modelo experimental. Todo el edificio de la genética se ha construido ampliamente sobre modelos experimentales sencillos: guisantes, moscas de la fruta, levaduras y bacterias. Todas las células con que trabajó Avery eran idénticas desde el punto de vista genético, o sea, constituían una línea pura y se desarrollaban rápidamente, de tal suerte que era posible seguir la herencia de los caracteres a lo largo de muchísimas generaciones en un corto espacio de tiempo, mientras se podía verificar con facilidad su capacidad para producir la neumonía inyectándolas a ratones.

Uno de los más importantes experimentos de Avery dio una respuesta muy clara. Tomó la mezcla de moléculas liberada por las bacterias muertas y añadió un enzima que destruye el ácido desoxirribonucleico. La destrucción de ese ácido suprimió la capacidad de la mezcla de transformar las bacterias inofensivas en otras causantes de la enfermedad. Mediante otros experimentos, Avery y sus colegas pusieron de manifiesto que el ácido desoxirribonucleico (ADN) era el responsable de la transformación de las bacterias inocuas en las causantes de la enfermedad.

## ÁCIDO DESOXIRRIBONUCLEICO (ADN)

Pero Avery no descubrió el ADN, sino que lo halló, sesenta años antes, el investigador Friedrich Miescher. Tanto él

como otros científicos que continuaron sus trabajos habían obtenido muchos datos acerca de la química de dicha sustancia. Se sabía que estaba constituido por unas moléculas, los nucleótidos, unidas unas a otras formando cadenas que contenían grandes cantidades de ácido fosfórico. Se trataba de una enorme molécula, la mayor de las presentes en la célula. El descubrimiento de Avery mostró que el ADN era la base material de la herencia. Esto es, *heredar algo significa recuperar un fragmento de ADN*. Los genes son ADN. La información es ADN y el ADN es información.

Desde los trabajos de Avery creció de manera vertiginosa el acopio de datos acerca del ADN, y en 1960 se descubrió de qué manera la información se halla codificada en él, cómo tal información se convierte en sustancia celular y de qué forma se copia dicho ADN para ser transmitido a la generación siguiente. Muchísimos científicos participaron en esta increíble proeza, aunque el genial hallazgo de James Watson y Francis Crick, al imaginar la correcta estructura del ADN en una doble hélice formada por dos cadenas enrolladas mutuamente, constituyó el adelanto más decisivo.

Las principales características del ADN son:

1. Se trata de una cadena molecular (esto es una sustancia constituida por distintos tipos de moléculas sencillas ligadas entre sí formando cadenas).
2. Es larguísimo y en extremo delgado. Si aumentáramos cien veces el tamaño del núcleo celular alcanzaría el tamaño de la punta de un alfiler, visible ya a simple vista, mientras que el ADN plegado en ese mismo núcleo alcanzaría la longitud de un campo de fútbol.
3. Hay cuatro tipos de eslabones (las moléculas denominadas nucleótidos) en la cadena. Sus nombres son: ácido adenílico, ácido guanílico, ácido citidílico y ácido timidílico y sus abreviaturas, A, G, C, T, respectivamente.

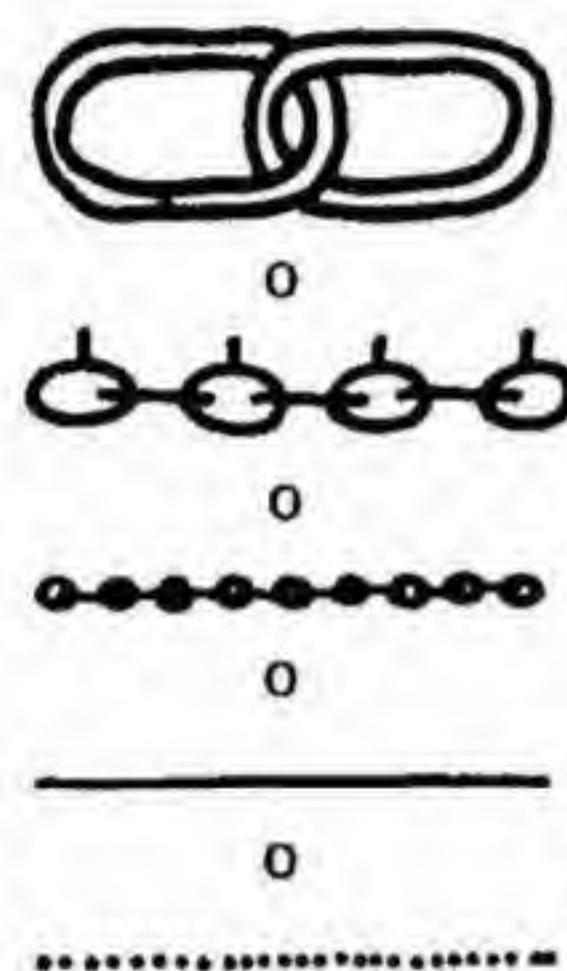


## LAS RAÍCES DE LA VIDA

4. La manera de ligarse los cuatro eslabones es idéntica en todos los casos, como en una cadena corriente.

5. Existe un orden exacto de los eslabones, igual que el de las letras en un libro.

A partir de aquí hay mucho que decir sobre las cadenas. Siempre que dibujaremos una cadena utilizaremos una de estas cinco formas en función de la más adecuada a cada caso.

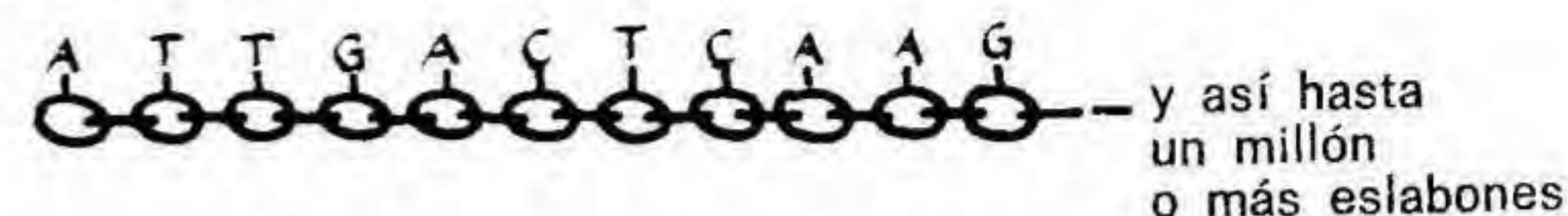


De hecho, las cadenas reales son mucho más largas que lo que sugieren nuestros dibujos.

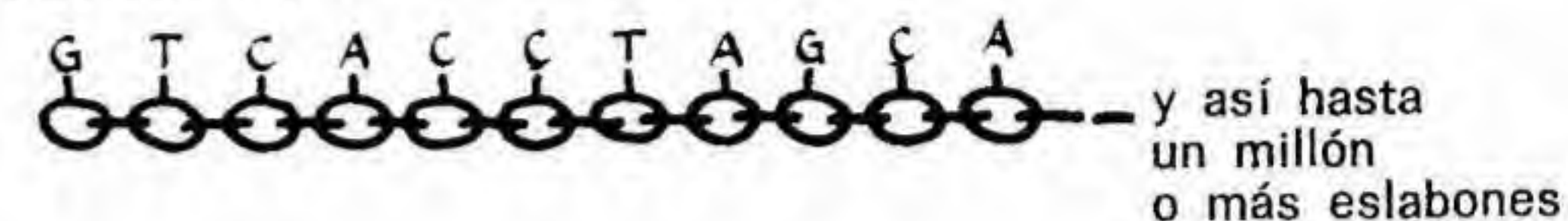
ADN = lenguaje = información

Ahora bien, si tenemos una cadena compuesta por eslabones de cuatro clases distintas y sabemos que contiene toda la información para obrar un nuevo individuo, debemos concluir que el secreto reside en la secuencia, u orden, de los eslabones. No hay otra manera de explicar cómo tenga tanto significado una cadena. De este modo la información no puede ser un mapa o una fotografía, una reproducción en dos dimensiones, sino más bien un conjunto de instrucciones «escritas» en una dimensión. Esa analogía con el lenguaje es total-

ADN de una especie



ADN de otra especie



mente correcta. El alfabeto del ADN contiene sólo cuatro letras pero el número de mensajes que es posible escribir con ellas es infinito —de la misma manera que no existe límite alguno a lo que puede decirse usando el alfabeto de dos letras (punto y raya) del alfabeto Morse.

Las letras de los libros están unidas formando secuencias por medio de su posición en el papel; asimismo, los cuatro eslabones o nucleótidos del ADN están unidos en secuencia por enlaces químicos. Cabe considerar el ADN total de un organismo dado como un libro en que todas las letras, palabras, frases, sentencias y párrafos están enhebrados conjuntamente y constituyen una larga cadena que «significa» todas las partes y funciones del organismo. Los organismos de gemelos idénticos contienen idénticos ADN, como dos libros idénticos, en los cuales no hay ninguna letra o palabra distinta; mientras que otro organismo de la misma especie posee un libro semejante aunque presenta frecuentes y destacadas diferencias gramaticales. Los libros de especies diferentes narran historias bastante distintas aunque muchas sentencias siguen siendo similares.

En la analogía anterior, los genes, que son fragmentos de la cadena, equivalen aproximadamente a sentencias. Un gen es una secuencia de letras (nucleótidos) que señala determinada estructura o función de un organismo. Los genes, igual



que las sentencias, están ensartados unos a continuación de otros, en la larguísima molécula del ADN.

## ¿CUÁNTA INFORMACIÓN SE REQUIERE PARA CREAR UN HOMBRE?

Visto qué es la información, tratemos de hacernos una idea aproximada de cuánta información se necesita para que surjan organismos vivos.

1. Una bacteria, criatura viviente simplicísima, tiene, en números redondos, 2.000 genes, cada gen cuenta con 1.000 letras (eslabones). O sea que el ADN de las bacterias debe tener, por lo menos, una longitud de 2.000.000 de letras.

2. Un hombre posee cerca de quinientas veces más genes que una bacteria, por lo que la longitud de su ADN será como mínimo de 1.000.000.000 de letras.

3. El ADN de las bacterias equivaldría, aproximadamente, a 20 novelas de extensión media, formada cada una por 100.000 palabras, mientras que el ADN humano equivaldría a 10.000 de dichas novelas.

## DEL LENGUAJE A LA SUSTANCIA

El significado del lenguaje del ADN estriba en su especificación de determinado organismo viviente. O sea, los genes proporcionan instrucciones para la creación de sustancia, la materia prima de la vida, de un ser vivo. ¿De qué manera el lenguaje del ADN se convierte físicamente en carne viva que respira, se mueve y reproduce? Para responder correctamente a dicha cuestión deberemos empezar por conocer de qué estamos hechos.

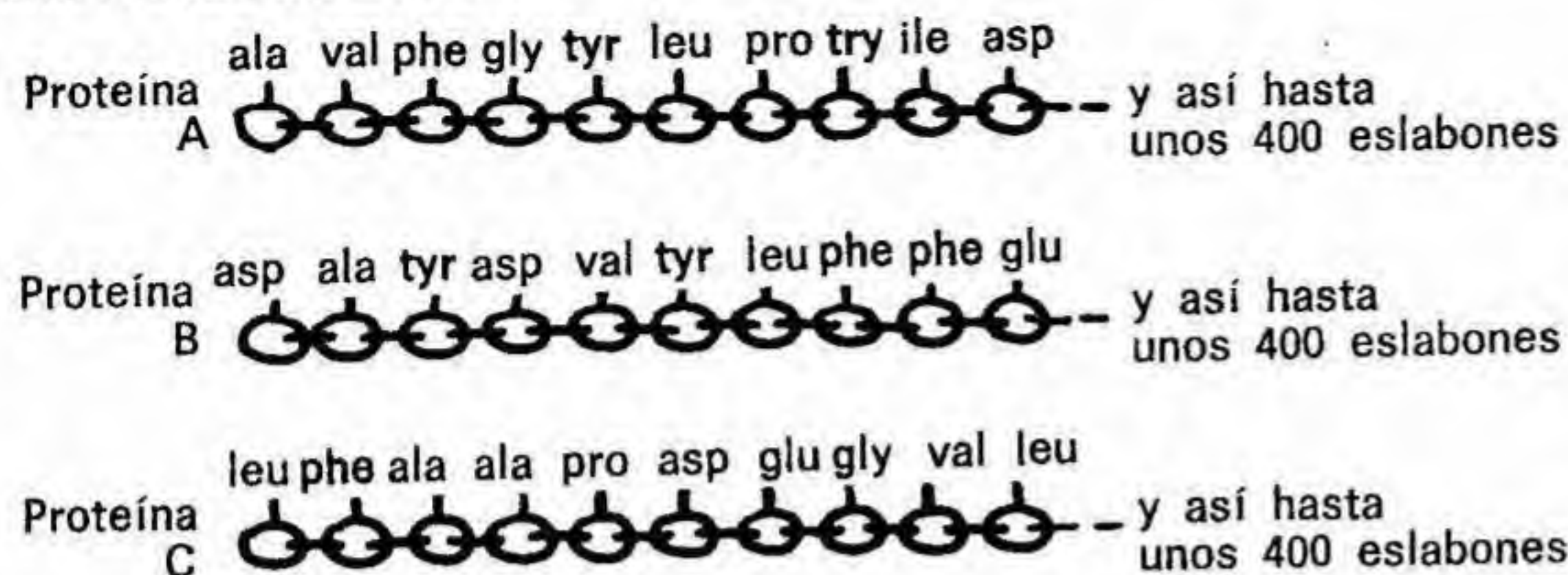
## PROTEÍNAS

Ello no supone un formidable problema como podría parecer. Con gran ventaja, el material más importante son las proteínas. El resto de componentes –agua, sales, vitaminas, metales, hidratos de carbono, grasas, etc.– son auxiliares de las proteínas. Éstas no sólo constituyen la mayoría de nuestra masa corporal (sin contar el agua) sino que de ellas parten nuestro calor, acciones, pensamientos y deseos, todo cuanto somos y todo cuanto hacemos. Por ejemplo, observo mi gato, toda su materia prima es proteína; la mayor parte de lo que veo –el pelo, los ojos, incluso el movimiento– es proteína; la materia prima es proteína. Pero es que, además, todo aquello que confiere a mi gato su personalidad única está determinado por proteínas especiales, que elaboradas a partir de las instrucciones del ADN constituyen la base física de la individualidad, de la singularidad, de la especie. Las proteínas son, para nosotros, como el metal para los automóviles. Hay otros materiales en un coche, pero el metal es el elemento estructural y funcional dominante que determina tanto el aspecto del coche como su capacidad de funcionamiento. La forma, calidad y posición de las partes metálicas concretan el modo en que un coche difiere de los demás.

Veamos un punto más y estaremos en condiciones de avanzar en el conocimiento de los fenómenos de la vida. ¿De qué se componen las proteínas? He aquí sus características:

1. Son cadenas moleculares.
2. Aunque largas, no lo son tanto como las del ADN.
3. Existen veinte clases de eslabones, los aminoácidos.
4. Las veinte subunidades se unen de idéntica manera.
5. El orden o secuencia de las veinte subunidades o eslabones es exacto y determina qué es la proteína y qué será su función especial última.





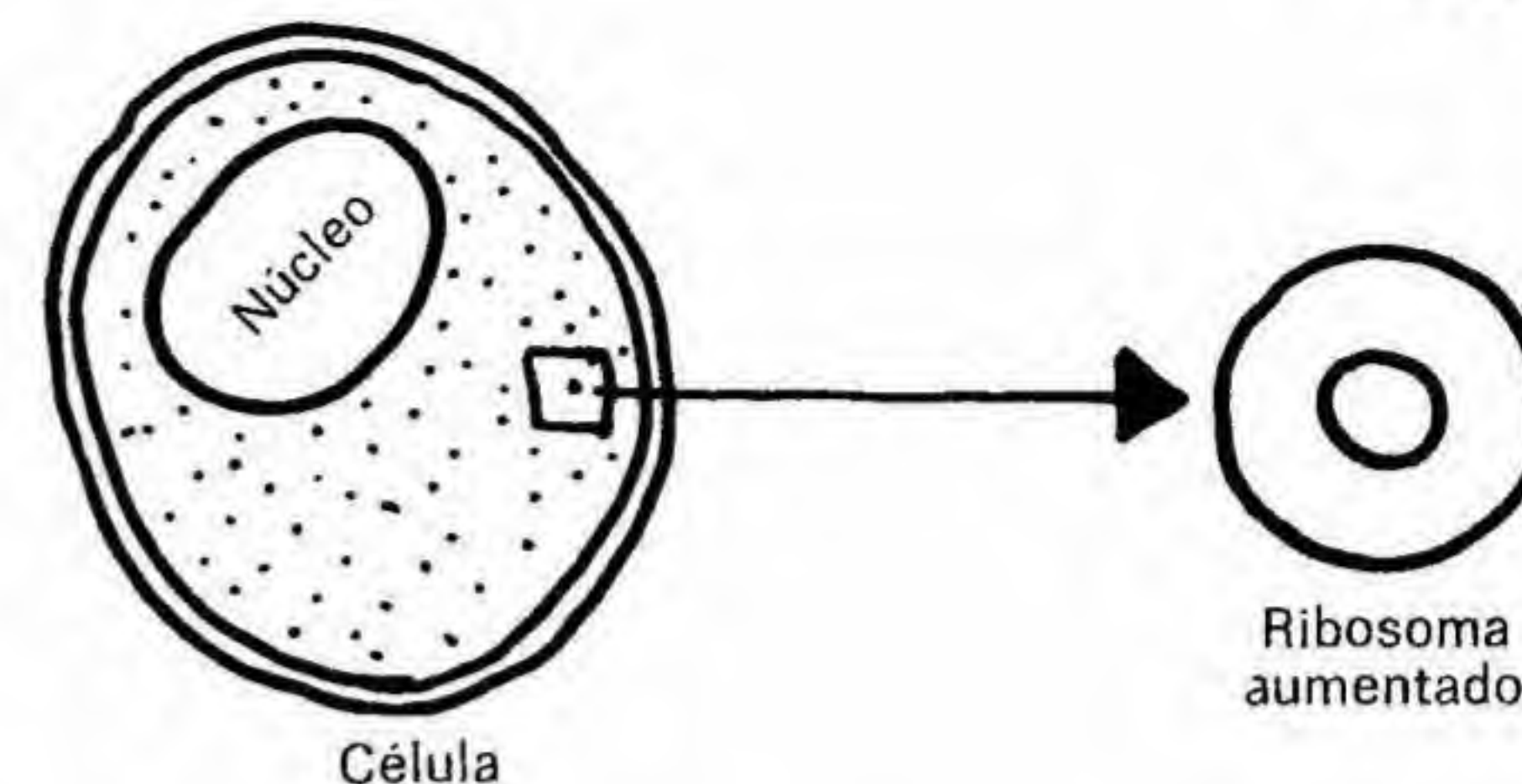
Los aminoácidos se representan como eslabones de una cadena, donde se indican con las tres primeras letras (en inglés).

Estos veinte aminoácidos son: fenilalanina, leucina, isoleucina, metionina, valina, serina, prolina, treonina, alanina, tirosina, histidina, glutamina, asparagina, lisina, ácido aspártico, ácido glutámico, cisteína, triptófano, arginina y glicina.

## TRADUCCIÓN

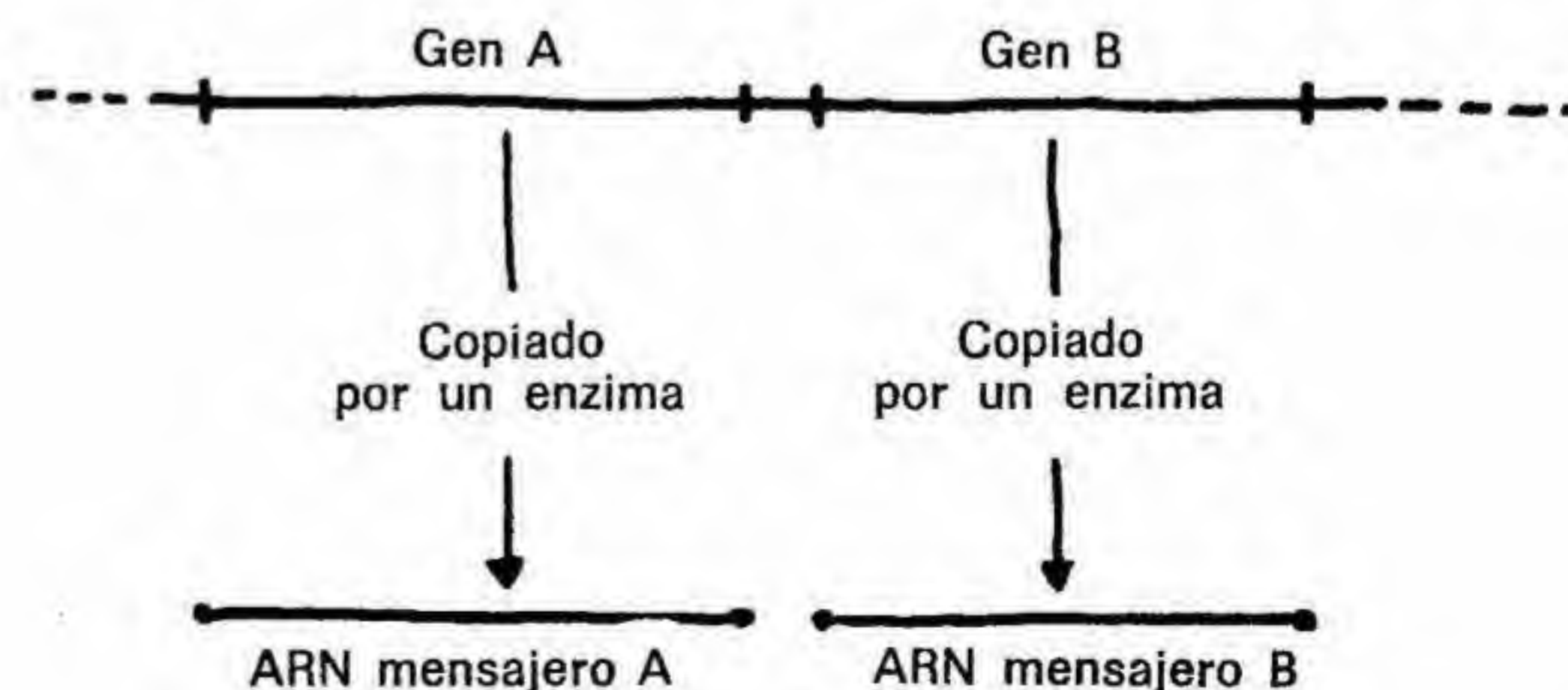
Nótese cuán similares son estas cinco características a las del ADN: cadenas, orden específico de los eslabones, veinte eslabones (letras) distintos en el alfabeto de las proteínas y cuatro en el del ADN. De inmediato resulta meridiano que la conversión de la información del ADN en sustancia proteínica debe ser un proceso de traducción de lenguaje: de una secuencia de letras en un alfabeto de cuatro letras a otra secuencia de letras en un alfabeto de veinte letras. Es decir, algo parecido a traducir un mensaje en alfabeto Morse —un lenguaje con un alfabeto de dos letras (punto y raya)— al castellano, un lenguaje con un alfabeto de veintinueve letras (a-z).

Y esto es justamente lo que sucede. Todas las células contienen millares de pequeñas e increíblemente ingeniosas máquinas de traducir, los ribosomas, que elaboran cadenas proteínicas. Éste es su modo de trabajar: en primer lugar, por



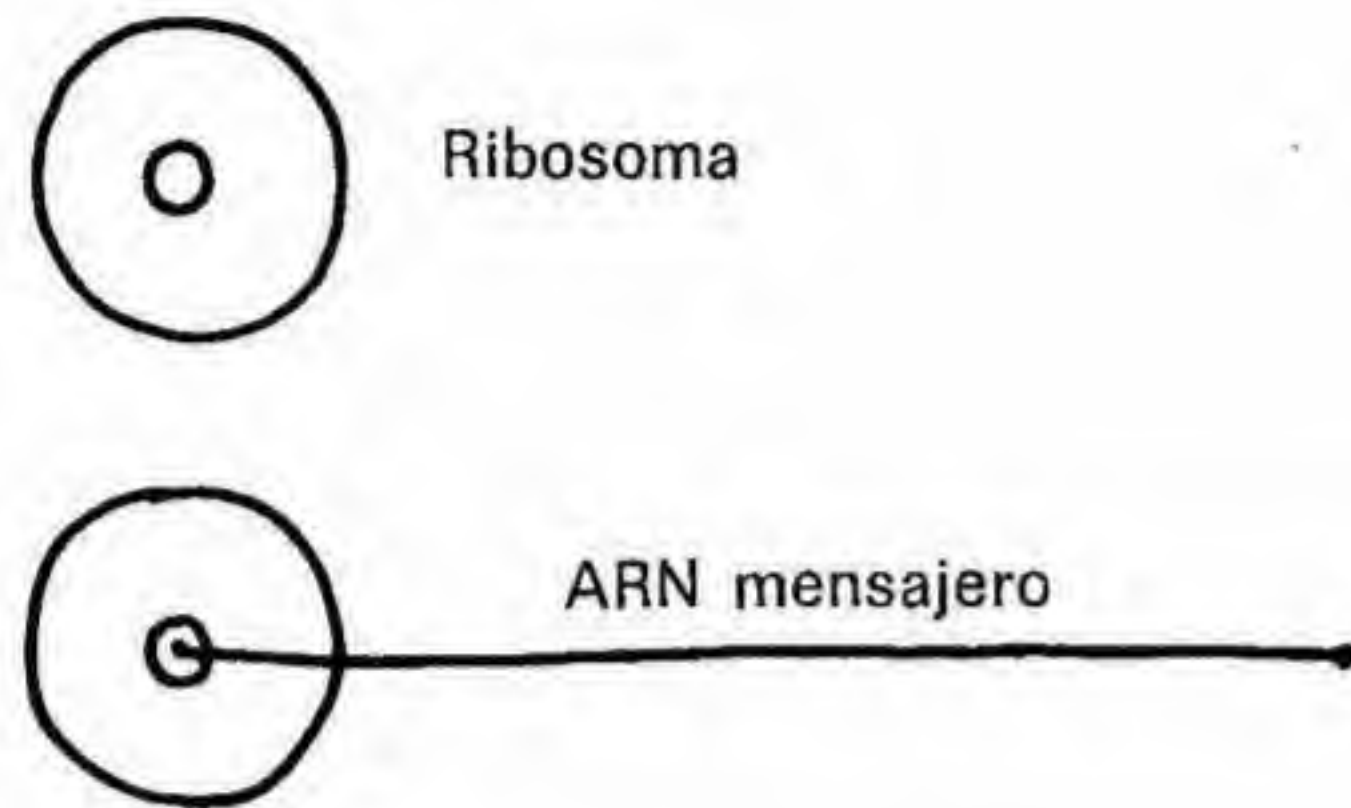
medio de un enzima, proteína que confiere rapidez al proceso, copia un fragmento de la información (un gen) del ADN. Esta copia del gen es un ácido ribonucleico (ARN) mensajero. Las moléculas de ARN son cadenas casi idénticas a las del ADN, aunque no tan largas. Una molécula de ADN contiene numerosos genes, mientras que una molécula de ARN mensajero es una copia de sólo un gen. Se les aplica el calificativo de mensajeros porque transportan el mensaje de los genes desde el núcleo, donde se encuentra el ADN, hasta el citoplasma (espacio celular exterior al núcleo), donde en los ribosomas se fabrican las proteínas.

Un segmento de ADN de unos dos genes de longitud (2.000 eslabones nucleótidos), representado mediante una línea

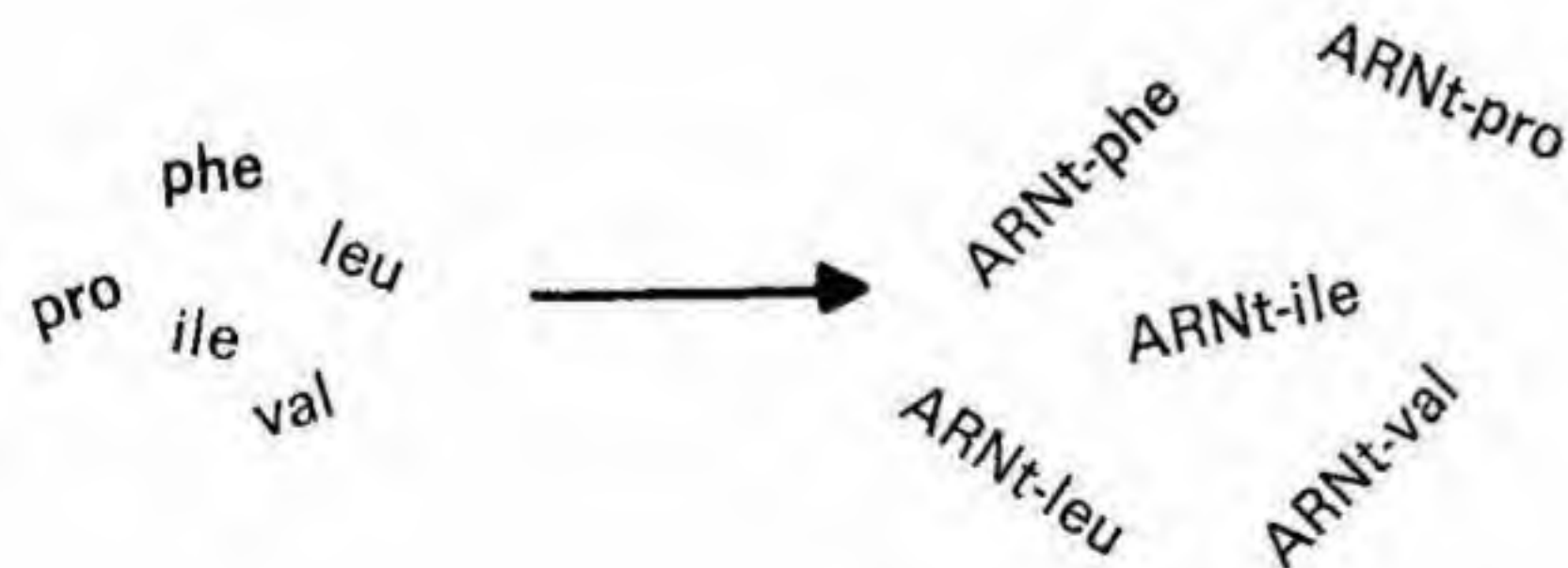




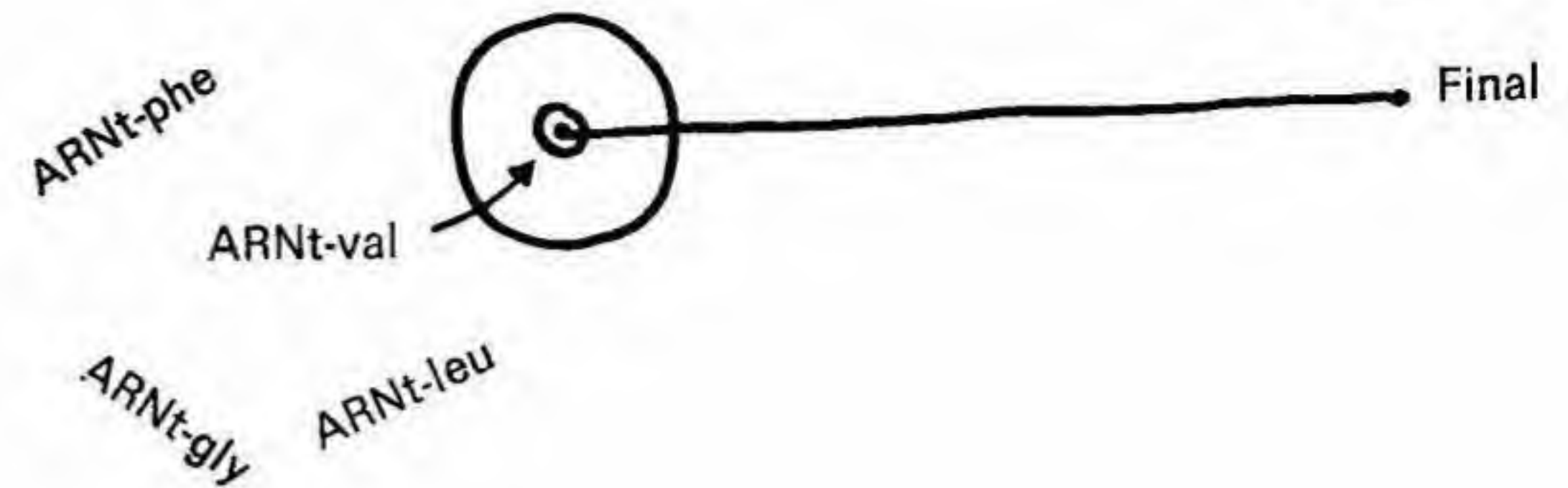
Al final la copia del gen, un ácido ribonucleico (ARN) mensajero, se introduce él mismo en el ribosoma.



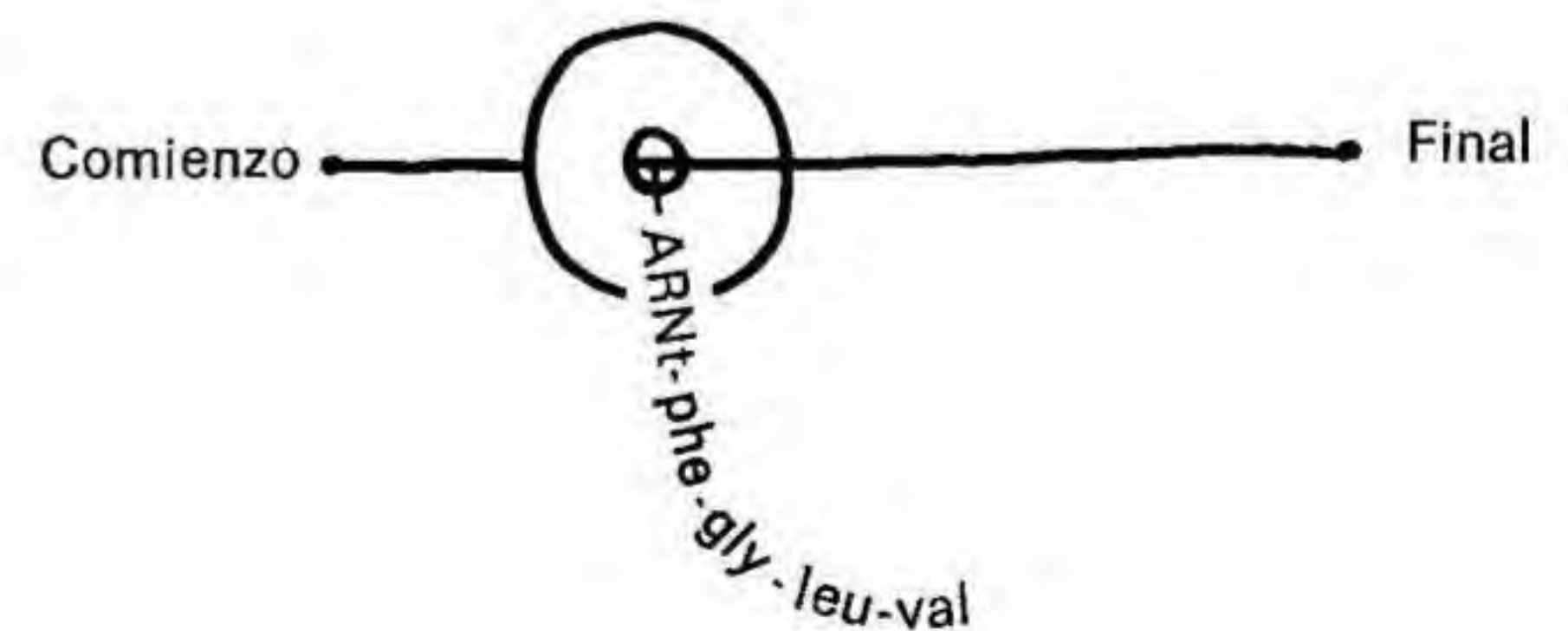
El ribosoma es un lector; lee la secuencia de nucleótidos (letras) en el ARN mensajero pero en lugar de pronunciar un discurso emite una proteína. Procede así: enzimas especiales unen aminoácidos a moléculas pequeñas de ARN, el ácido ribonucleico de transferencia (ARNt). Cada una de las veinte clases de aminoácidos queda unida a su propia y especial mo-



lécula de ARNt. Las moléculas de ARNt, con los aminoácidos agregados, quedan a disposición del ribosoma.

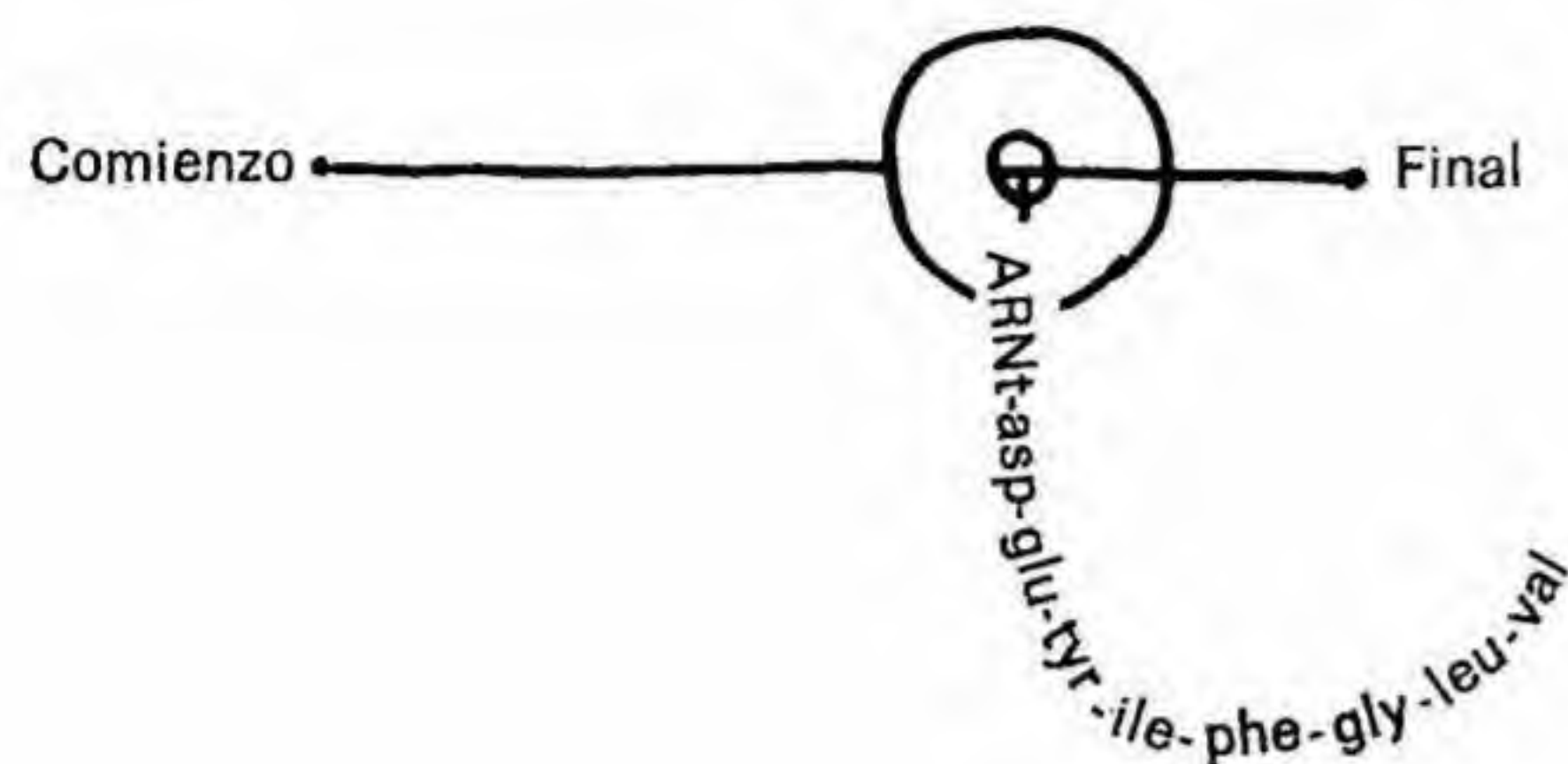


El ribosoma selecciona el próximo ARNt (con su aminoácido agregado) en función de la fraseología del mensajero que está leyendo en aquel momento. Por ejemplo, si el ribosoma está leyendo en el mensajero un grupo de nucleótidos que especifican el aminoácido alanina, selecciona un ARNt con un grupo de apareamiento de nucleótidos al que se halla unido el aminoácido alanina. El apareamiento de los nucleótidos del mensajero a un determinado aminoácido depende de las relaciones naturales de apareamiento de los nucleótidos. Cada conjunto de nucleótidos del mensajero se acopla perfectamente con el grupo de apareamiento de nucleótidos del ARN. De esta manera cada nuevo aminoácido –y su ARNt– entra en el ribosoma y se sitúa de modo que dicho aminoácido queda químicamente ligado con el aminoácido que le precede en el ribosoma.

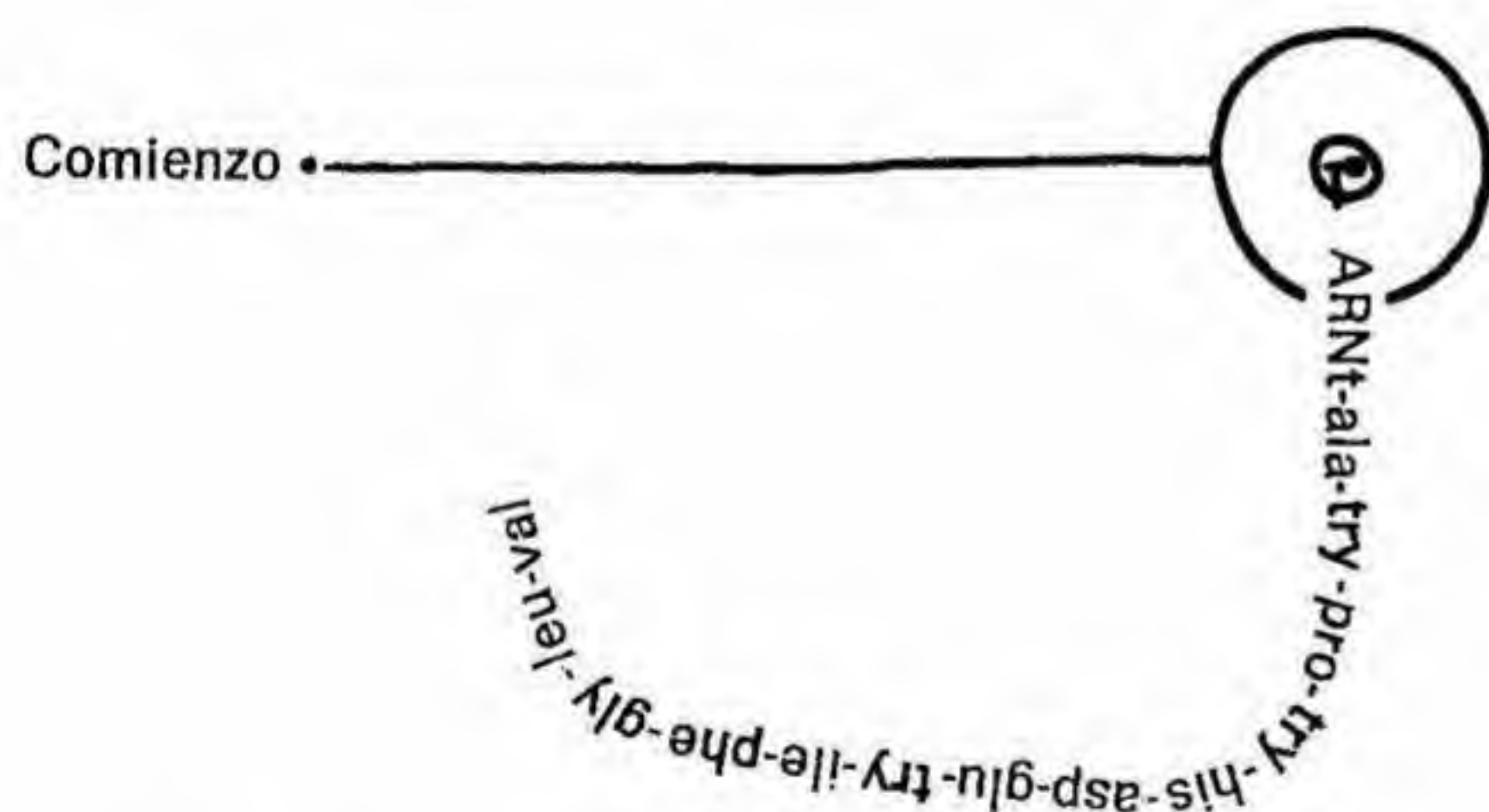




Así quedan engarzados en una secuencia los eslabones, uno cada vez. A medida que el ribosoma lee el mensajero, crece rápidamente la longitud de la cadena proteínica.



Cuando termina la lectura de la cadena del mensajero, se libera la cadena proteínica completa.



Así nace una nueva proteína. Una secuencia de nucleótidos en un gen o secuencia de ADN especifica exactamente una secuencia de aminoácidos en una proteína. Un gen, una proteína. El concepto un gen, una proteína, se estableció mucho antes de que se supiera cómo se formaban las proteínas.

En el decenio de 1930, George Beadle, bioquímico que experimentaba con levaduras demostró, en una serie de brillantes experimentos, que de los cambios ocurridos en genes únicos resultaban daños en proteínas únicas. Posteriormente se confirmó y amplió esto utilizando bacterias como organismos de experimentación. Este considerable trabajo –y mucho más que lo que se pueda relatar aquí– no habría sido posible sin el importante descubrimiento realizado anteriormente por Hermann Muller de que se podían producir cambios en el ADN (mutaciones) mediante exposición de los sistemas vivientes a los rayos X. El ADN contiene tantos genes como proteínas distintas hay en las células (2.000 en las bacterias, 200.000 en los humanos).

La fidelidad con que la maquinaria elaboradora de proteínas realiza el proceso de traducción es ciertamente remarkable. Se pueden tolerar pocos errores en la producción de las miles de proteínas necesarias para la vida celular. No existen máquinas humanas capaces de transcribir el equivalente de 2.000 novelas con tan pocos errores.

## Descubrimiento del ARN

Junto con Paul Zamecnik, mi primer mentor de investigación, descubrimos, en 1956, el ARN de transferencia y explicamos su modo de acción. Zamecnik había demostrado previamente que los ribosomas eran las estructuras donde se ensamblaban las proteínas. Por mi parte, había probado un año antes que los aminoácidos eran excitados –esto es, predispuestos a reaccionar con otros aminoácidos– por una clase especial de enzimas (véase el capítulo 4). Pero quedaba un vacío por llenar, algo a lo que los aminoácidos deberían unirse y con ello lograr la necesaria identidad para «reconocer» su lugar indicado por el ARN mensajero. Paul Zamecnik y quien



escribe estas líneas descubrimos en las células unas moléculas pequeñas de ARN que presentaban gran afinidad por los aminoácidos, esto es, los aminoácidos se unían a ellos con excepcional firmeza. Pronto nos dimos cuenta de que llenaban aquel vacío intermedio en la construcción de las proteínas. A finales del año siguiente, después de una muy intensa y afortunada investigación, teníamos una idea bastante completa de la función del ARNt en la construcción de las proteínas, tal como la he descrito antes.

## DE LAS CADENAS A LOS SERES TRIDIMENSIONALES

Hasta aquí la exposición resulta muy satisfactoria: los mecanismos vivos utilizan un lenguaje en cadenas. Ir desde el plan hasta el producto final es una simple tarea de traducción, pero queda todavía un gran obstáculo por superar. La traducción convierte un símbolo en otro símbolo, una dimensión en otra dimensión, una cadena en otra cadena, nucleótidos en aminoácidos. ¿Cómo pasar de la cadena a la sustancia, a moléculas de proteína que hacen sus funciones, a seres que pueden tocar y coger semillas, flores, ranas, hombres? Tenemos, todavía, que franquear la distancia desde una dimensión a tres dimensiones.

La respuesta estriba en la naturaleza de los eslabones de las cadenas de proteínas: los aminoácidos.

Aunque las moléculas de proteína son cadenas, de hecho son —en el aspecto físico— auténticas estructuras tridimensionales, como no lo es ninguna cadena real. Los veinte aminoácidos distintos de las proteínas no son símbolos inertes, cada uno tiene propiedades químicas únicas. Algunos presentan tendencia a establecer enlaces químicos con sus semejantes; unos son más ácidos, otros más básicos; unos son hidrófilos, otros hidrófobos; la estructura de algunos es tal que hace que

la cadena se retuerza, etc. Y muchos cuentan con propiedades muy especiales, por las cuales la proteína que constituyen tiene una función única. Según el lugar de la cadena en que se encuentren determinan la forma última de ésta. Las cadenas, una vez completas, se pliegan y retuercen sobre sí mismas como un ovillo; más precisamente, una bola de cadena, una cosa tridimensional, real, palpable. En esas cadenas, la secuencia de aminoácidos determina la manera exacta en que la molécula se plegará cuando sea libre para hacerlo. La manera de plegarse, a su vez, determina la forma, las propiedades, así como la función de la molécula proteínica.

El gen para las proteínas musculares instruye a la maquinaria de elaborar proteínas para formar una cadena proteínica que se plegará según una forma final, una larga fibra que presenta la capacidad de deslizarse sobre las fibras vecinas, lo cual produce la contracción. La cadena proteínica —la proteína transportadora del oxígeno en las células sanguíneas—, la hemoglobina, se pliega según una configuración tridimensional, la única capaz de captar y liberar el oxígeno. Y así miles de cadenas proteínicas, donde cada una de sus secuencias está determinada por la secuencia de nucleótidos en los genes, se pliegan según configuraciones especiales, lo cual les confiere funciones únicas.

## CREAR ORDEN ES PRINCIPALMENTE ELABORAR CADENAS

Recordemos lo dicho a propósito del orden en el primer capítulo: la vida propende hacia el orden en un Universo que tiende rápidamente hacia el desorden. Ahora veremos con mucho mayor claridad qué significa exactamente esta afirmación. Estar vivo significa, literalmente, establecer enlaces y formar cadenas en un orden definido exactamente y con anterioridad. Establecido dicho orden, cabe considerar la adqui-



sición de la forma y la función finales casi como un proceso automático: un resultado espontáneo, si se quiere, de colocar una cosa frente a otra.

## LA IMPORTANCIA DE LOS ENLACES QUÍMICOS DÉBILES

Del estudio de las más importantes moléculas de la célula —el ADN, el ARN y las proteínas— puede deducirse una generalización muy interesante: las conexiones químicas débiles son vitales para la vida. Los enlaces fuertes son los que unen los aminoácidos entre sí en la proteína o los nucleótidos en el ADN y en el ARN, así como cada eslabón de la cadena a su vecino. Pero los enlaces débiles producen y mantienen la configuración y el plegado finales de todas las grandes moléculas. En el ADN, los enlaces débiles entre los nucleótidos mantienen a las dos cadenas juntas para formar una doble hélice, esencial, como veremos, para la producción del ADN. En las proteínas, los enlaces débiles entre los aminoácidos convierten a las proteínas en estructuras plegadas, esenciales para su función. Y, por su parte, en la formación de nuevas proteínas en los ribosomas, las moléculas de ARN de transferencia son capaces de «encontrar» su propia localización en el ARN mensajero por apareamiento de sus nucleótidos con los nucleótidos de configuración complementaria del ARN mensajero. La virtud de tales enlaces esenciales estriba en que, por ser débiles, son transitorios, puesto que, cumplida su función, pueden romperse fácilmente y ser usados de nuevo.

## VIRUS: ÍNTIMOS DE LA VIDA PERO NO VIVOS

Los virus constan de proteína y de ADN o de ARN. De modo que presentan información en forma de ADN o de

ARN y tienen identidad sustantiva en forma de proteína. Sin embargo, no pueden reproducirse por sí mismos, necesitan la ayuda de las células. Su proteína permite al virus encontrar una célula e introducirse en ella. En su interior encuentra la maquinaria —la de la célula— para producir más copias de sí mismo. Terminada esta operación y habiendo cumplido así su cometido, el virus y su progenie desandan sus pasos y salen de la célula para repetir el nefasto proceso en otra célula. Durante esta serie de acontecimientos el virus puede matar la célula que lo hospeda, dañarla, cambiarla o simplemente dejarla intacta, depende del tipo de virus y de la clase de célula. Un virus puede inducir un importante cambio en una célula: convertirla en cancerosa. Este misterioso fenómeno constituye el objeto de buena parte del intenso trabajo actual en la investigación del cáncer, tal como veremos en el capítulo 8. Se sospecha que los virus, aunque más simples que las células, no son más primitivos que ellas. Parece probable que procedan de partes normales de la célula que en determinado momento de un pasado remoto se separaran para establecer su propia forma parásita de «vida». No consideramos los virus como seres vivos por cuanto no son capaces de reproducirse por sí mismos de forma independiente.

## MORTALIDAD E INMORTALIDAD

Ahora sabemos que la creación de un individuo requiere un conjunto de instrucciones escritas, que han sido copiadas una y otra vez, con remarcable fidelidad, durante muchos millones de años, mientras que los individuos mueren al cabo de unos pocos años. Nos podemos preguntar, por tanto, si las instrucciones son inmortales, al menos tan inmortales como algo pueda serlo para un biólogo. El individuo, mortal por naturaleza, que nace y muere es el guardián transitorio de las



instrucciones que deben ser transmitidas a las generaciones siguientes, el participante en una carrera de relevos, en la cual el ADN es el testigo. Desde el punto de vista biológico, una vida individual sólo tiene significado en la medida en que transmite información desde sus antecesores hasta sus descendientes. Algunas mariposas nacen sin boca y empiezan a ayunar desde el momento de su nacimiento –siendo su única misión aparearse y poner huevos rápidamente, de tal suerte que la información de la mariposa pueda pasar a la generación siguiente.

Si el ADN es la inmortalidad de los mortales, la insaciable curiosidad humana no puede dejar de formularse esta pregunta: ¿Cómo empezó todo?

### 3. Inicios

¿Qué fue primero, el huevo o la gallina? Esta trillada pregunta carece de respuesta, no porque nos remita hacia atrás en la monotonía de un ciclo repetitivo sino porque debido al efecto acumulativo de pequeños cambios en cada vuelta del ciclo, los protagonistas –a la larga– desaparecen. Una genealogía del pollo que se remontará a mil millones de años nos revelaría una gradual transformación de nuestro emplumado compañero en una forma que ya no sería, de ninguna manera, un pollo. Por mi parte, aventuro que sería algo tan pequeño como la cabeza de un alfiler y viviría en el océano. Tendríamos parecida constatación si trazáramos nuestro propio linaje hasta tan lejos.

¿Y si llegáramos aún más allá? Debemos presumir que fue el inicio. Las insinuaciones sobre la inmortalidad del ADN, hechas en el capítulo anterior, exigen ahora mejor perspectiva. Estas enormes moléculas, llenas de la necesaria información para crear nuestras actuales formas vivientes sobre la Tierra, deben de haber tenido un comienzo modesto en algún momento de un pasado distante.

Las mejores estimaciones suponen que la vida comenzó hace 3.000.000.000 de años, cuando, al cabo de unos 2.000.000.000 de años después de formarse la Tierra, ésta se había enfriado lo suficiente. Existen fósiles de más de



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

2.000.000.000 de años de antigüedad de criaturas marinas, muy sencillas y extremadamente pequeñas. Seguramente, los antepasados de aquellas criaturas fosilizadas eran aún más pequeños, y cabe suponer también que la forma más primitiva de vida fue una célula, probablemente no muy distinta de las formas más sencillas de organismos unicelulares que abundan actualmente.

Así las cosas, la cuestión principal para nosotros es: ¿Cómo se supone que apareció la primera célula? (No cómo apareció, pregunta que nunca obtendrá una respuesta segura, ya que nadie estuvo allí para verlo.) Cabe imaginar ingeniosas suposiciones y hacer experimentos que nos indiquen probabilidades.

## LOS INGREDIENTES ESENCIALES

Tenemos una bonita idea, basada en las conclusiones de los estudios de los geólogos, paleontólogos, físicos y biólogos, acerca de cómo era probablemente la Tierra hace 3.000.000.000 de años. Los libros y las películas de ciencia ficción son muy gráficos al respecto y probablemente bastante correctos: grises extensiones, completamente estériles, de roca y lava, sin una brizna de hierba; volcanes en erupción; escayados picos montañosos; mares humeantes; sombrías nubes y continuos e interminables aguaceros perturbados periódicamente por relámpagos y rachas de truenos —algo que no vio ni oyó ninguna criatura viva. Hubiera sido, sin duda, un lugar miserable para cualquier ser humano, pero fue bueno para el inicio de la vida. He aquí lo que habría sido necesario para que la vida echara a andar:

1. Elevada temperatura.
2. Gran cantidad de agua.

3. Fuentes de los átomos necesarios de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y fósforo.

4. Una fuente de energía.

Ningún problema por lo que respecta al calor y al agua. Mientras la Tierra se enfriaba, millones de años de lluvia llenaron los océanos, que se calentaban por el calor que todavía retenía la tierra. Proporcionaban la energía los relámpagos así como la radiación ultravioleta procedente del Sol, siempre que sus rayos lograban atravesar las nubes. (Estas radiaciones fueron mucho más potentes entonces que ahora, debido a que en aquel tiempo no había la capa de ozono existente en la parte alta de nuestra atmósfera. El ozono absorbe con eficacia la radiación ultravioleta. La capa de ozono se ha formado a partir del oxígeno que gradualmente se ha ido acumulando en la Tierra como consecuencia de la actividad de la vida vegetal.)

Estas condiciones son, sin duda, lo bastante simples para un comienzo sencillo: elaborar cadenas de información (ADN) y cadenas de sustancia celular (proteínas). Pero antes de contar con cadenas debe haber eslabones: los nucleótidos del ADN y los aminoácidos de las proteínas. Como se sabe, estos eslabones son moléculas pequeñas, agrupaciones de los elementos carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y fósforo enlazados químicamente.

## CREACIÓN DE MOLÉCULAS SENCILLAS

He aquí el escenario. Compuestos sencillos, que contienen carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y fósforo, en disolución en el agua de mar, bombardeados continuamente por los relámpagos y las radiaciones ultravioleta. Como consecuencia de ello, se ven forzados a unirse en combinaciones varias, algunas de las cuales resultan estables y duraderas.



Como quiera que el proceso continuaría durante cientos y cientos de millones de años, el mar se fue enriqueciendo cada vez más en combinaciones complejas de elementos –moléculas– incluidos nucleótidos y aminoácidos. Realmente comienza una nueva era cuando el mar se convierte en una especie de sopa, en un potaje recargado de una abundancia pasmosa de todo tipo de nuevas moléculas.

## LA IMPORTANCIA DEL TIEMPO

Hagamos una pausa para considerar el significado del tiempo en el proceso que estamos examinando. Cuanto de más tiempo se disponga es más probable que aquello que puede acontecer ocurra. De este modo, en el dominio de las reacciones químicas, incluso aquellas más improbables podrán desarrollarse si no hay limitación de tiempo. Y si los productos de aquellas reacciones son estables, podrán convertirse en componentes, en cierta medida, permanentes de las aguas oceánicas.

## LA SOPA ES POSIBLE PORQUE NO HAY VIDA

Ahora bien, la idea de que el mar sea algo parecido a una sopa nos parece algo lejano. No hay nada comparable en nuestro mundo de hoy día. Un caldo concentrado de aquel tipo no puede llegar a acumularse en la actualidad porque los seres vivos se lo comerían; abundan las bacterias y otras diminutas criaturas voraces y dondequiera que aparece una fuente de alimento lo consumen y crece su número hasta agotarlo; de modo que podemos imaginar los océanos convirtiéndose en una sopa porque no había vida en ellos.

## SIMULACIÓN DE LABORATORIO DE ACONTECIMIENTOS ANTIGUOS

Es evidente que lo antes descrito es una hipótesis que nunca se podrá probar. Podemos, sin embargo, mostrar en el laboratorio que tal vez empezó así, y para ello es preciso conseguir simular en él las citadas condiciones primitivas. Aquellos compuestos sencillos que pensamos que probablemente estuvieron presentes en el mar de hace 3.000.000.000 de años se introducen en disolución en un matraz, el cual se conecta a una fuente de descargas eléctricas para simular las entradas de energía procedentes de los relámpagos. Se esterilizan todas las partes del sistema para estar seguros de la ausencia de células vivas; a continuación se inician las descargas eléctricas y se somete a cocción el contenido del matraz durante cierto tiempo para después abrir el matraz y analizar su contenido en busca de compuestos de nueva creación.

El resultado de tal experimento es por completo convincente: a partir de sustancias orgánicas sencillas que contienen los cinco elementos se obtienen tanto nucleótidos como aminoácidos. O sea, es posible producir los eslabones de las cadenas de la vida en un ambiente semejante al marino utilizando descargas eléctricas como fuente de energía.

## FORMACIÓN DE CADENAS DE MOLÉCULAS

El siguiente paso, como es obvio, consiste en acoplar los eslabones para formar cadenas del tipo del ADN y de las proteínas. Es razonable suponer que si la simulación en el laboratorio de las condiciones primitivas promueve la constitución de eslabones, también moverá el que éstos se acoplen para generar cadenas. Y, ciertamente, en realidad se forman de este modo cadenas cortas, cuya química básica es idéntica a la de los ADN y a la de las proteínas actuales.



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

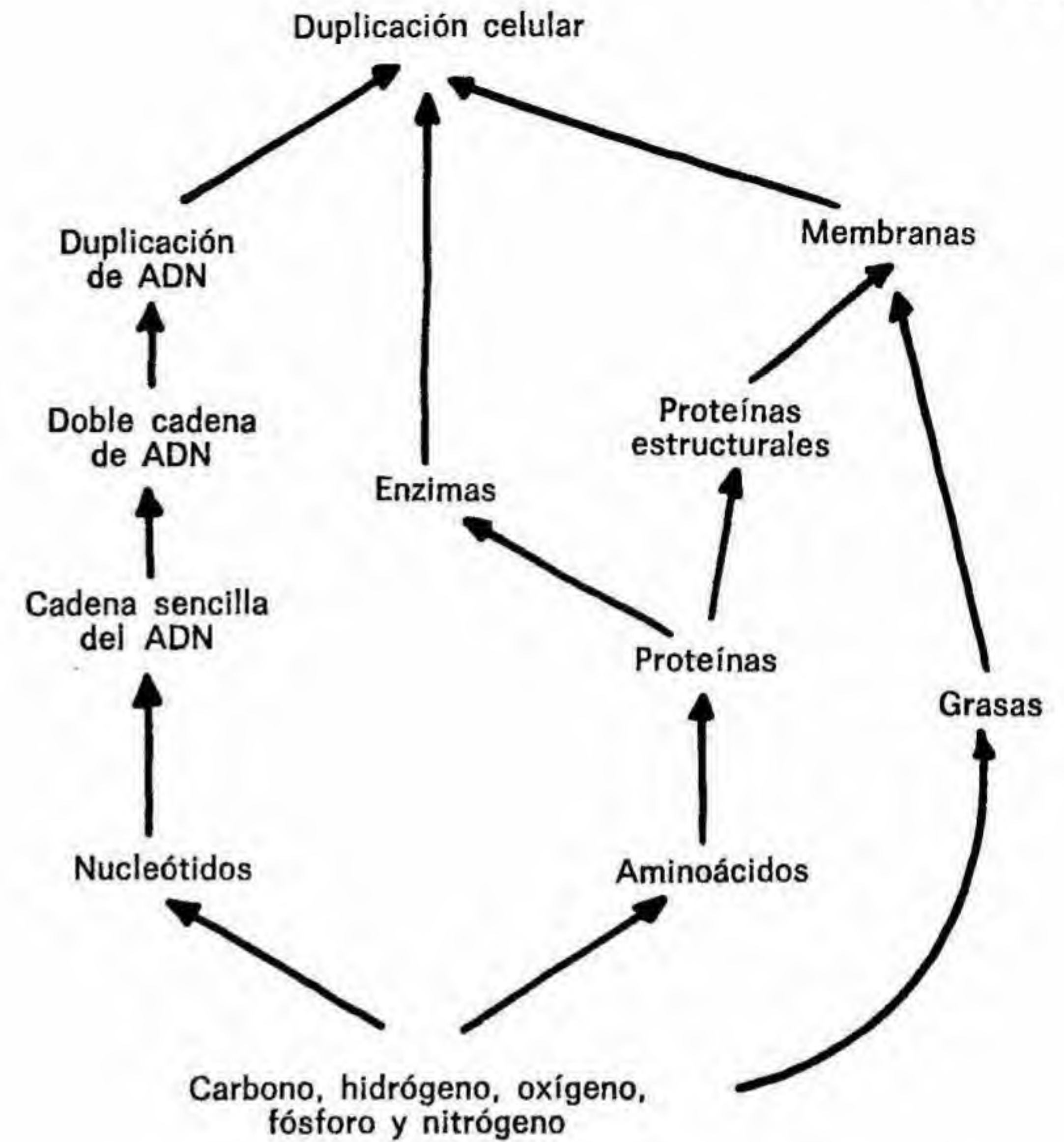
Recordemos, empero que tales experimentos muestran cómo pudo acontecer, no cómo aconteció. Esta situación apenas difiere del problema que trató de resolver Thor Heyerdahl, cuando quiso demostrar si los polinesios pudieron haber alcanzado su actual tierra navegando hacia poniente desde América del Sur. Al completar felizmente su propia travesía en una almadía, Heyerdahl probó únicamente que el viaje era posible para cualquiera que hubiera utilizado un tipo similar de transporte, pero eso no probaba que los polinesios hubieran efectuado realmente el viaje.

## HACIA LA CÉLULA

Debemos considerar ahora cinco hitos complementarios de gran importancia en el camino hacia la célula.

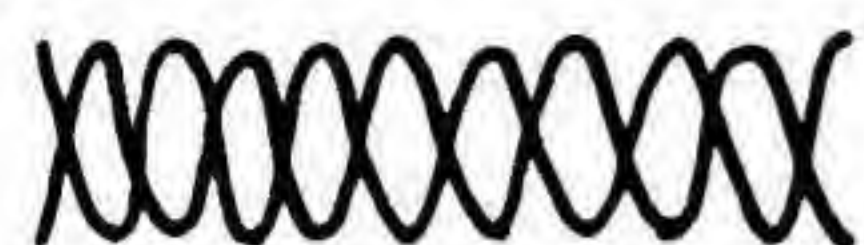
1. *Aparición de los enzimas.* Los enzimas son moléculas proteínicas —una clase especial de moléculas de proteína que hacen que las reacciones químicas de las células se desarrollen más deprisa. Todas las células vivientes hoy día contienen miles de enzimas, cada uno de los cuales tiene su función particular: descomponer los materiales alimenticios, producir energía a partir del alimento, facilitar la construcción de cadenas moleculares desde moléculas sencillas así como otras innumerables tareas. El ritmo lento de los acontecimientos asociados con la aparición de la vida se aceleraría con la de los enzimas. Los primeros enzimas quizá fueron cadenas cortas de aminoácidos que se habían ensamblado al azar. Por una serie de «pruebas y errores», algunas de tales combinaciones podrían haber producido una proteína cuya única propiedad fuera acelerar algunas reacciones.

2. *Doblado del ADN.* Imaginémonos millones de cadenas de ADN creciendo lentamente en el océano por adición al

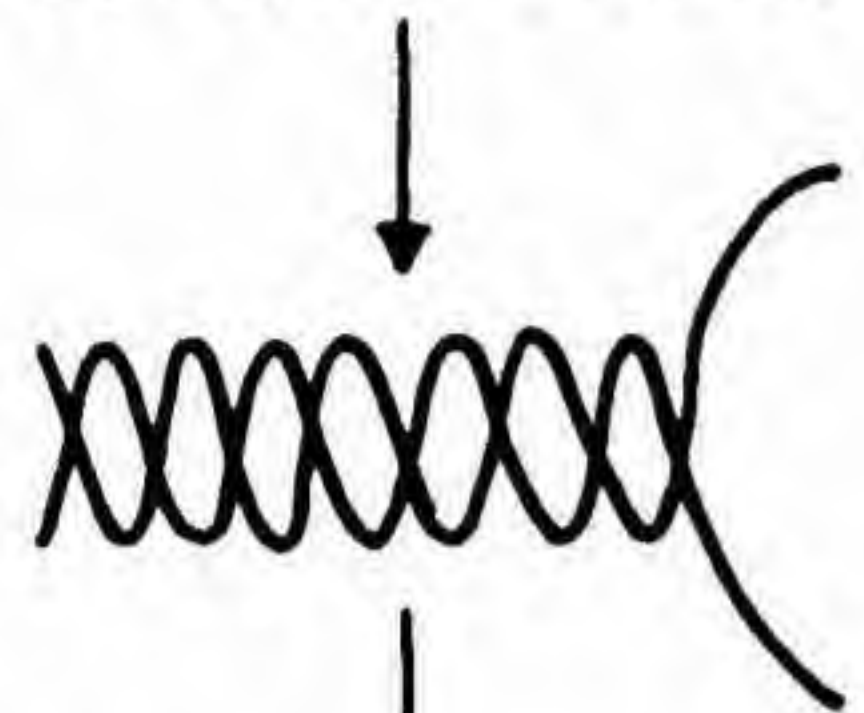


azar de nucleótidos; gradualmente se irían formando algunas secuencias con sentido —eso quiere decir que podrían contener instrucciones para la elaboración de algunas proteínas primitivas. De éstas, unas podrían ser enzimas útiles o partes de estructuras necesarias. Cuanto más largas resultarían estas delicadas moléculas de ADN mayor sería el peligro de rotura, de modo que la aparición fortuita de algún medio de protección y estabilización hubiera sido de gran valor. Un simple doblado de los filamentos cumple estas funciones: dos filamentos enrollados uno sobre el otro estarán mucho menos ex-

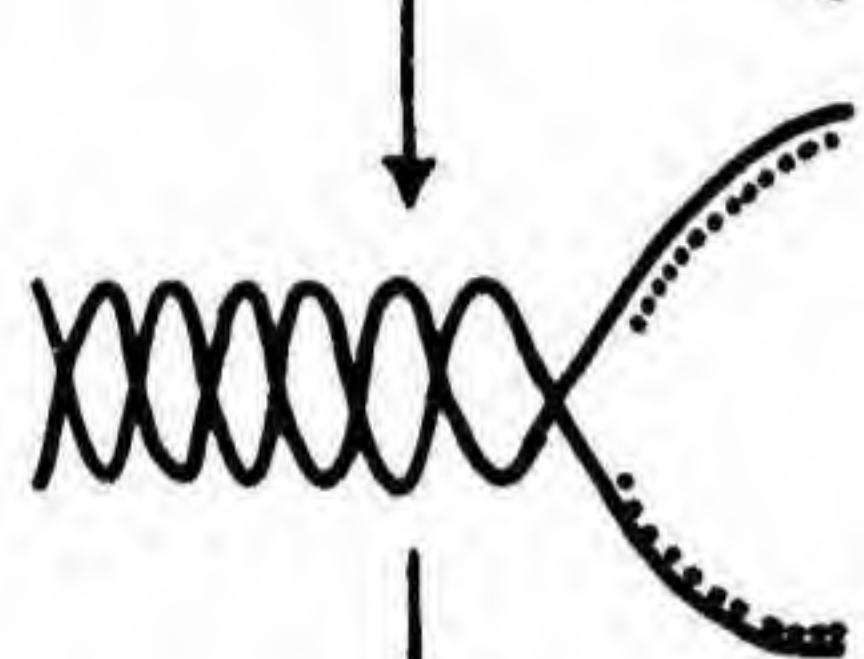




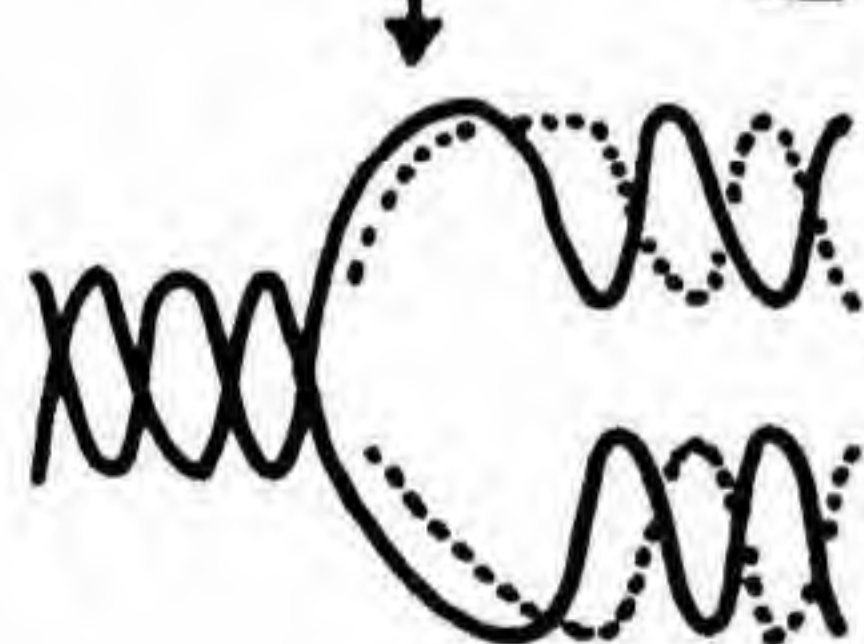
ADN doble



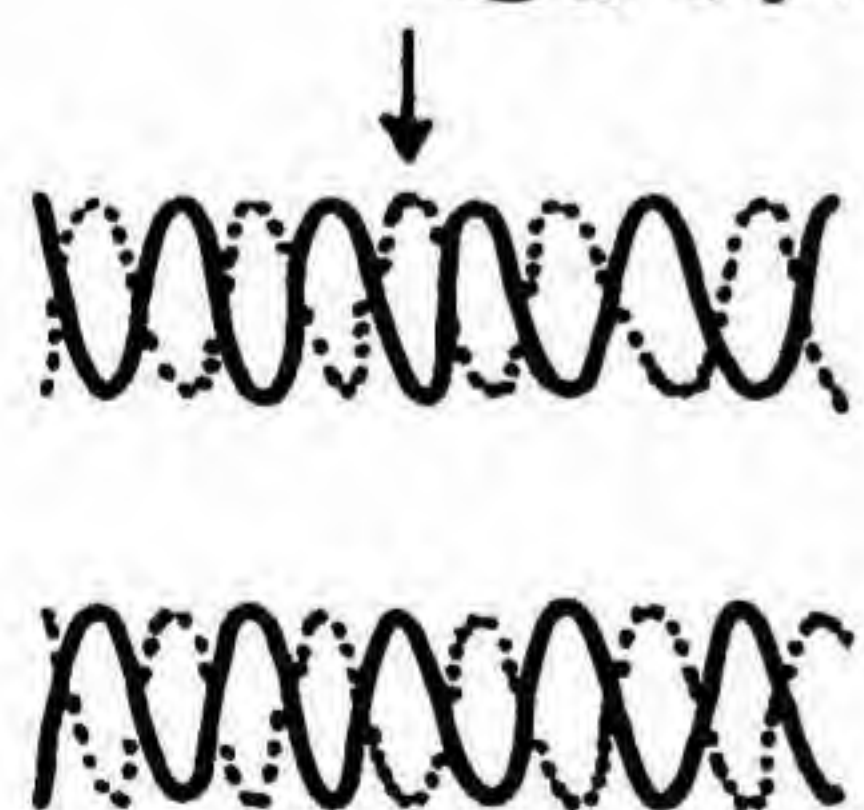
Desenrollado



Acoplamiento de nucleótidos sobre cada filamento



Adición de nuevos nucleótidos para continuar la formación de nuevas dobles hélices de ADN

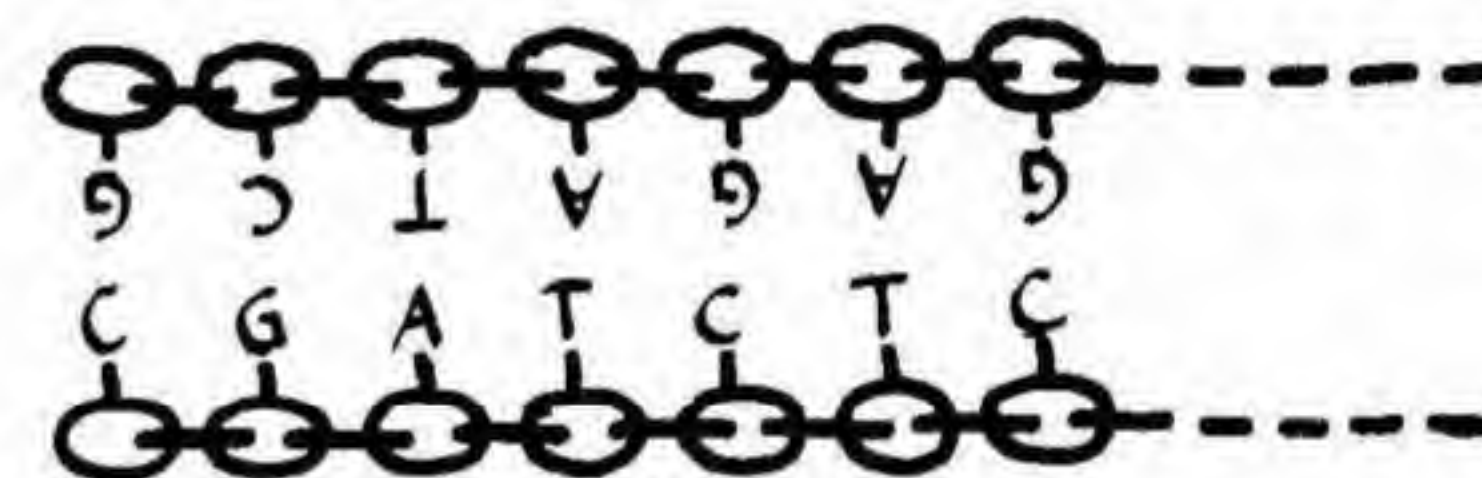


Dos nuevas moléculas idénticas a la vieja; cada una contiene un filamento nuevo y otro viejo

puestos a cualquier daño que cada filamento por separado. Además, el ADN de doble filamento es esencial para el proceso de la duplicación del ADN.

3. *Duplicación del ADN.* Con este proceso, cada filamento de la doble cadena del ADN fabrica una copia de sí mismo, esto es, una segunda doble cadena. Se trata de una operación elegante y simple que empieza cuando, tal como se muestra aquí, los dos filamentos empiezan a separarse, desenrollándose como los cabos de una cuerda.

Los nuevos nucleótidos se ensamblan y alinean ordenadamente a lo largo de cada filamento viejo. La secuencia de nucleótidos en cada nuevo filamento viene especificada exactamente por los nucleótidos del viejo filamento. La razón es que los nuevos nucleótidos se aparean únicamente con sus opuestos específicos del filamento antiguo.



El ácido adenílico (A) se aparea siempre con el ácido timidílico (T), y el guanílico (G) se aparea siempre con el citidílico (C)

Cuando el proceso acaba hay dos dobles cadenas, cada una de ellas con un filamento nuevo apareado con uno antiguo. Cada doble cadena es idéntica a la otra en todos los sentidos. (Cuando termina esta tarea en una célula ya está lista para dividirse en dos, y cada una de las dos nuevas células recibe una doble cadena de ADN idéntica.)

El proceso de duplicación del ADN no pueden llevarlo a cabo por sí mismas las moléculas del ADN ni los nucleótidos. En la actualidad, y presumiblemente también en los comienzos de la vida, dicha función, de la misma manera que todas las demás reacciones celulares, requiere enzimas.



4. *Empaquetamiento de las principales piezas.* Un acontecimiento crítico en la génesis celular pudo haber sido el recubrimiento de todas las moléculas esenciales mediante una cubierta o envoltura. Ello pudo haber servido para proteger el ADN, las proteínas y otras moléculas decisivas y también para disponerlas más próximas entre sí y de esa manera favorecer su funcionamiento coordinado. Tanto las proteínas como las grasas, estas últimas sustancias proporcionarían la capacidad de rechazo del agua que aseguraría el aislamiento de la célula de su medio, constituyen elementos importantes de tales recubrimientos celulares, las membranas.

5. *Duplicación celular.* La adquisición de una membrana envolvente de las moléculas supondría la creación de algo muy próximo a la célula. Sin embargo, una célula resulta inútil a menos que pueda autoduplicarse. Cuenta con los componentes esenciales: información duplicable para construir una nueva célula, y enzimas para realizar las funciones celulares esenciales, envueltos y protegidos todos ellos dentro de una membrana. La duplicación de este conjunto debió implicar, obviamente, la coordinación de todos los componentes en una operación de extrema complicación, cuyos detalles desconocemos todavía. Una vez conseguida, sin embargo, quedaba desbrozada la senda hacia el presente.

## LA VIDA SE ORIGINÓ UNA SOLA VEZ

Pienso que esta extraordinaria génesis ocurrió una sola vez. Preciso, probablemente una sola vez. Existen dos razones para afirmarlo. En primer lugar, todas las criaturas vivientes actuales —sin excepción— utilizan los mismos elementos constructivos (los mismos cuatro nucleótidos, los mismos veinte aminoácidos y las demás cosas) y la misma maquinaria general para fabricar sus moléculas de proteína (ribosomas, ARN

de transferencia, ARN mensajero) y para gobernar las demás actividades celulares. Deberíamos esperar, en cambio, que si la vida se hubiera originado más de una vez, cada inicio hubiera comportado distintos materiales de construcción y maquinaria diferente. El hecho de que todas las criaturas vivientes contengan idénticos materiales de construcción e idéntica maquinaria constituye un argumento muy convincente de su origen único.

Otra razón para creer que la vida tuvo un origen único estriba en que la forma más primitiva de vida pudo haber consumido rápidamente la sopa de la que se originó, de modo que ella y su descendencia habrían eliminado el rico ambiente que crearon millones de años de cocción. Quizá parezca un poco difícil aceptar que una diminuta célula y su descendencia consiguieron esquilmar los vastos océanos de todo cuanto supusiera alimento adecuado, pero consideremos la siguiente cuestión: la bacteria común *E. coli* puede doblar el número de sus miembros cada 20 minutos si se le suministra su alimento favorito. Esto significa que si empezamos en este momento con una sola célula tendremos 2 al cabo de 20 minutos y 8 después de la primera hora, de la misma manera que habrá 64 después de 2 horas, 512 a las 3 horas, 4.096 a las 4 horas, 32.768 a las 5 horas y así sucesivamente. Salta a la vista que el incremento de la masa celular es como una reacción atómica en cadena. Si la *E. coli* pudiera continuar creciendo sin limitación alguna de alimento durante 24 horas, la masa de células que se formaría podría cubrir la Tierra con una capa de una milla de grosor. El hecho es que una célula única comerá y se dividirá hasta que haya agotado el alimento disponible (o hasta que sus residuos constituyan un veneno para sí misma) y que no existen límites a la cantidad de alimento que puede consumir. De modo que, en un tiempo relativamente breve, incluso con un ritmo lento de división, una célula primitiva y su descendencia pudieron consumir todo el alimento de los



océanos. No quedaría nada que pudiera permitir la aparición de cualquier otra forma de vida.

## INTRODUCIR ENERGÍA

Hemos señalado que la energía fue esencial para el inicio de la vida. Un relámpago o una descarga de radiación ultravioleta causaría el ensamblaje de algunas moléculas para formar cadenas de moléculas, el cual fue, y es, esencial, para la edificación de los procesos vitales.

En la ilustración de la página 10 mostrábamos cómo para crear orden entre objetos dispuestos al azar se requiere información. En el capítulo 2 hemos expuesto qué es en realidad la información. También sabemos que se necesita energía. Ahora investigaremos más detalladamente el flujo de energía en el mundo viviente.

# 4. Energía

## 4. Energía

El contador de radiactividad de mi laboratorio había comenzado a marcar algunas cifras, que yo esperaba impacientemente. Había preparado un experimento, fruto de un año de trabajo, que podría verificar una idea que había planteado acerca de cómo las células confieren energía a los aminoácidos para constituir, ensamblándolos, proteínas. Descubrir el mecanismo quizá arrojaría alguna luz sobre los primeros pasos en la formación de los materiales más importantes del cuerpo, las proteínas. Aquellos números, para mi incredulidad y alborozo, estaban de acuerdo con mis predicciones. La ciencia nos enseña a ser prudentes en cuanto a las expectativas pero en aquel instante comprendí que acababa de hacer un importante descubrimiento. Poco después de publicar mi trabajo, lo confirmaron otros investigadores. Fue el inicio de una serie de descubrimientos que en un plazo de cinco años proporcionaron un completo conocimiento de la síntesis de las proteínas.

En este capítulo se tratará más adelante de ello, pero primero se repasará someramente cómo utilizan la energía los animales y las plantas, tema considerado brevemente en el capítulo 1.



## UN SAUCE QUE TOMA EL AIRE

En 1630, Johann van Helmont plantó un sauce que pesaba 2,5 kg en 91 kg de tierra. Cinco años después el sauce había ganado 75 kg y el suelo había perdido 60 g. Este experimento probaba de forma convincente que el suelo no era la fuente originaria a partir de la cual se formaba la materia vegetal; sin duda, el agua del suelo era esencial para la planta. Van Helmont regó regularmente su sauce y la planta utilizó dicha agua para facilitar su crecimiento. Incluso hoy, hay quien le cuesta comprender de dónde sacan las plantas el material de que se componen, si éste no procede del suelo. Que procede del aire, es una respuesta que puede parecer difícil de aceptar. De ahí proceden, sin embargo, los materiales que las plantas necesitan para formar su propia sustancia. Dicho material es el dióxido de carbono. El agua aporta a ello átomos de hidrógeno y también una parte del peso total de la planta. Así se entiende cómo el sauce de Van Helmont pudo crecer de forma tan exuberante tomando tan poco del suelo.

## LAS PLANTAS CAPTAN LA LUZ DEL SOL

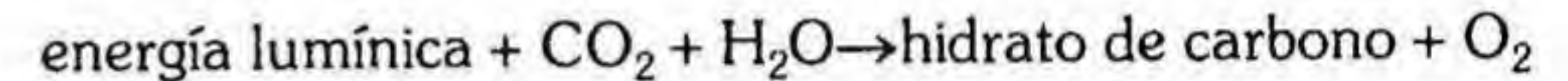
Pero incluso con dióxido de carbono, el sauce de Van Helmont hubiese languidecido sin algo que ni el suelo, ni el aire, ni el agua pueden proporcionar: la luz del Sol. La energía de la luz solar es necesaria para que se desarrollen los procesos internos conducentes a que el dióxido de carbono se transforme en la sustancia del sauce.

En el capítulo anterior se vio que la energía que permitió el inicio de la vida procedía probablemente de las descargas eléctricas y de las radiaciones ultravioleta. Pero durante las primeras fases de la existencia celular apareció un dispositivo mucho más efectivo para obtener energía: el sistema clorofíli-

co, que permite a las plantas captar la energía de la luz solar y utilizarla en el interior de la célula.

La clorofila, responsable del color verde de las plantas, hierbas, hojas y acículas, es un pigmento verde, cuyos átomos están dispuestos de tal forma que la luz que incide sobre la superficie de la planta la capta el interior de la molécula. Con la ayuda de enzimas que los mantenga en contacto y otras moléculas proteínicas, la clorofila convierte, acto seguido, la luz en energía eléctrica y después en energía química, utilizable para la formación de la planta.

Una manera sencilla de describir la estrategia global de la vida vegetal es:



Esta expresión indica que las plantas, mediante la energía solar, consumen moléculas de dióxido de carbono y moléculas de agua y las convierten en moléculas de hidratos de carbono. Se libera el oxígeno como residuo. La planta emplea el hidrato de carbono como fuente de energía combustible para la formación de la sustancia vegetal. Dicho de otra manera, la planta consume su propio hidrato de carbono para crecer.

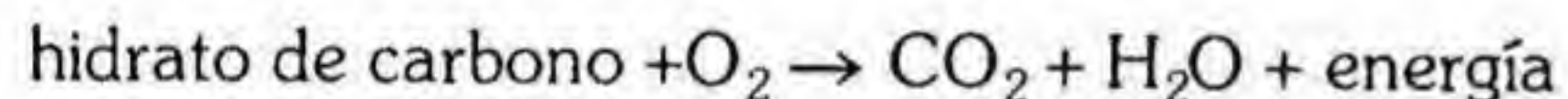
## LOS ANIMALES CONSUMEN PLANTAS

Los animales no pueden existir sin oxígeno libre y éste no estaba disponible en la atmósfera primitiva, aunque de la fórmula anterior se deduce que es el producto de desecho de las plantas, que no lo utilizan. A medida que aparecían más y más plantas y medraban sobre la Tierra, en el transcurso de cientos de millones de años, el oxígeno se fue acumulando en la atmósfera, creando de manera gradual un ambiente capaz de poder sostener la vida animal. Asimismo, el oxígeno que se



acumulaba paulatinamente en la atmósfera sirvió para que se fuera formando una capa de ozono, que actualmente protege a todos, plantas y animales, de los efectos perjudiciales de la luz ultravioleta. (Hoy, esta capa de ozono resulta dañada por los derivados fluorocarbonados utilizados como propulsores en los aerosoles. Así, como dato, en los Estados Unidos anualmente se venden tres mil millones de tales aerosoles. Los derivados fluorocarbonados ascienden hasta la capa de ozono, donde se descomponen, y producen la rotura de las moléculas de ozono en oxígeno. En consecuencia, se incrementa la cantidad de radiación ultravioleta que alcanza la superficie de la tierra, radiación que puede dañar el ADN de los seres vivos.)

En algún momento de la evolución, las formas de vida animal empezaron a desarrollar la utilización de las plantas en dos sentidos: comiéndoselas por el alimento (hidratos de carbono) que contienen y absorbiendo (respirando) el oxígeno que producen. La ecuación que describe la estrategia global de la vida animal es, por tanto:

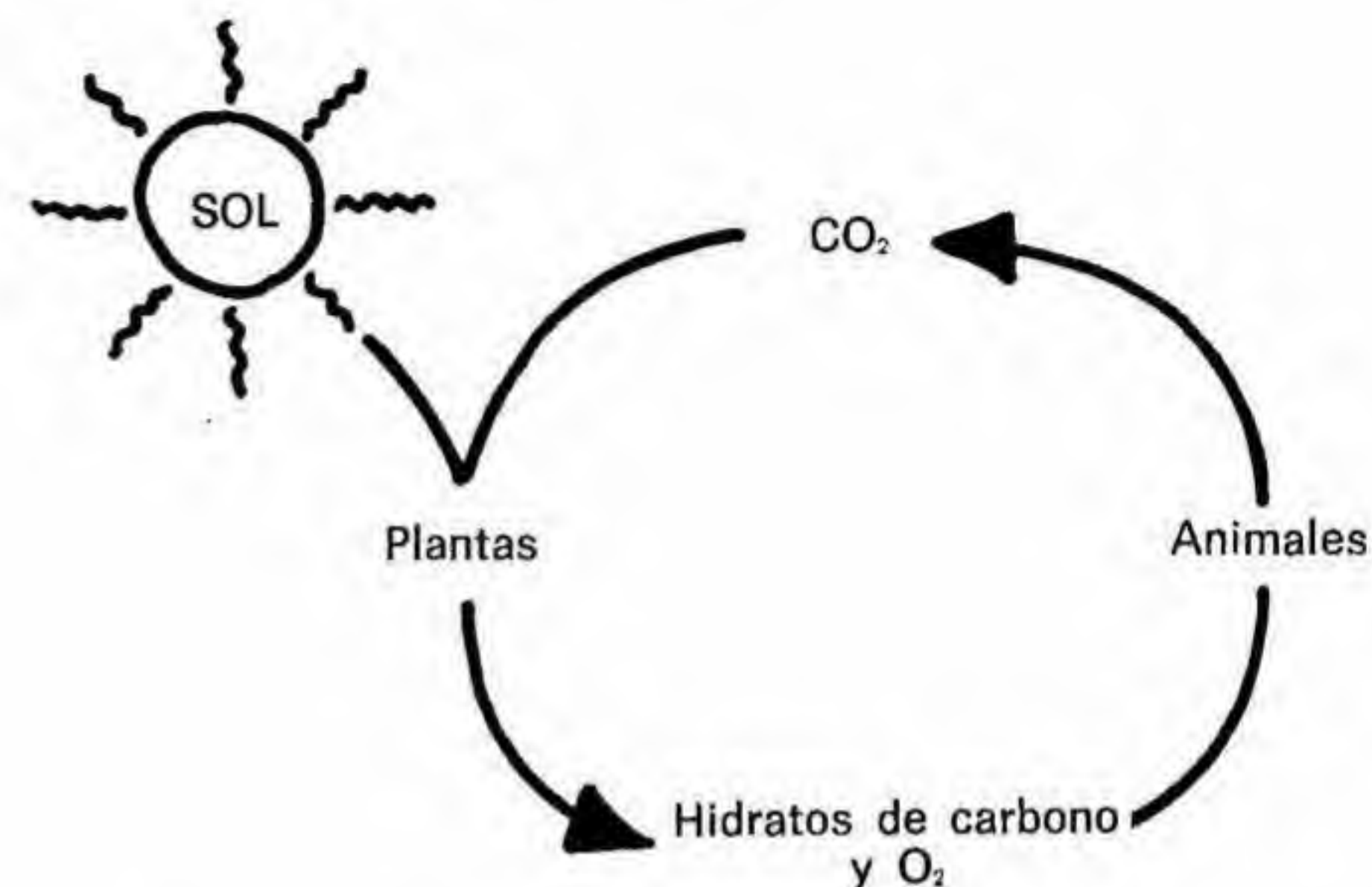


El hidrato de carbono, que los animales obtienen comiendo plantas, es «quemado» en presencia de oxígeno, y se generan dióxido de carbono y agua, como residuos. Este proceso de combustión produce energía química, utilizable en el interior de las células animales para formar sustancia animal. De modo que cuantas más plantas (hidratos de carbono) comen los animales, más pueden crecer.

## LAS PLANTAS Y LOS ANIMALES SE NECESITAN MUTUAMENTE

Las plantas y los animales dependen, por completo, unos de otros. Las plantas producen el oxígeno que los animales

respiran y los animales generan el dióxido de carbono que las plantas utilizan como material constitutivo. Combinando las ecuaciones de la vida vegetal y la vida animal se obtiene este ciclo de todas las criaturas vivas:



Esta expresión cíclica es, simplemente, otra manera de decir que la ecuación de la vida vegetal leída al revés es idéntica a la de la vida animal. Pone de manifiesto la completa interdependencia entre la vida animal y la vegetal y el hecho de que las plantas debieron estar bien instaladas en la Tierra antes de que los animales encontraran seguridad. También resulta claro que toda la vida –animal y vegetal– depende de la energía solar: las plantas de forma directa; los animales, mediante las plantas. Sin el Sol, nuestro planeta no sólo sería oscuro sino también sin vida, completamente muerto. He ahí un experimento sencillo para comprobar la interdependencia entre las plantas y los animales. Se encierran un caracol de agua dulce y una plantita acuática, junto con un poco de agua, en un tubo de ensayo y se expone al sol. Tanto la planta como el caracol se mantendrán sanos durante semanas. El



caracol come parte de la planta y produce dióxido de carbono como desecho; la planta consume ese dióxido de carbono, crece y produce el oxígeno que el caracol utiliza para quemar los hidratos de carbono que ha comido. Si se coloca ese tubo a oscuras, ambos, la planta y el caracol, no tardarán en morir.

## LA MUERTE CREA VIDA

Cuando los animales y las plantas mueren, se descomponen la enormemente compleja organización de cadenas de proteínas, ADN y ARN que constituyen sus cuerpos; esto es, otros organismos –principalmente bacterias– destruyen el orden creado por la vida para obtener materiales que, a su vez, utilizan para crecer y multiplicarse. El dióxido de carbono, principal producto de desecho, retorna a la atmósfera, donde una nueva vida vegetal puede volver a utilizarlo. La mayor parte del dióxido de carbono de la atmósfera procede de la descomposición de los animales y vegetales. Si no existiera tal descomposición, no debería preocupar qué hacer con los cadáveres, por cuanto toda vida dejaría de existir en unos pocos años.

## ENERGÍA PARA CONSTITUIR CADENAS

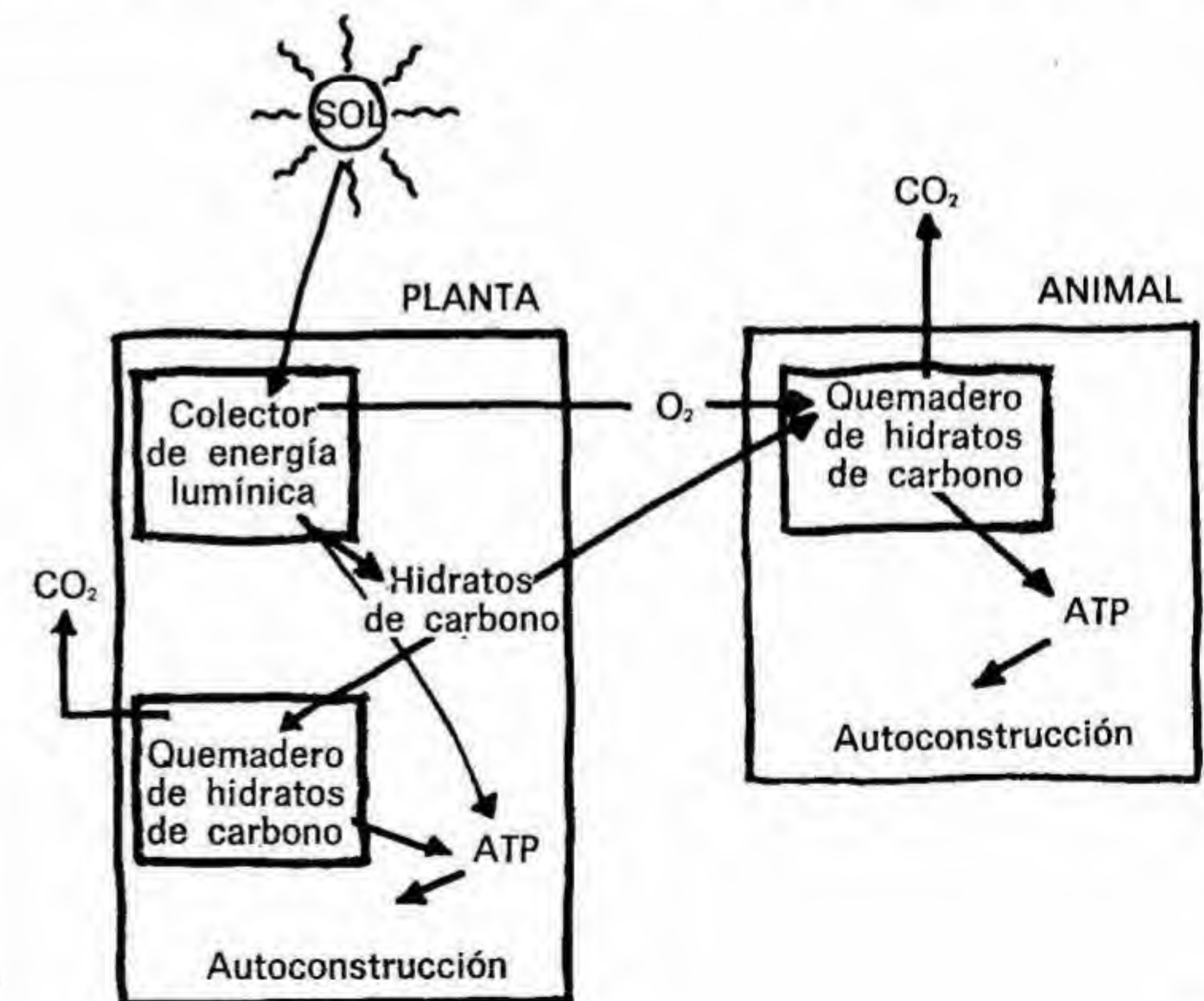
Resulta fácil de comprender que el surgimiento de la clorofila fuera un acontecimiento de tanta trascendencia en el proceso de la evolución. Tras su aparición se produjo una expansión casi explosiva de la vida –tanto animal como vegetal– sobre la tierra.

¿De qué manera la energía solar captada por la clorofila se pone a disposición de las células para formar la sustancia celular? La función más importante que ha de realizar es en-

samblar los eslabones para formar cadenas. De modo que se necesita saber cómo la energía posibilita el crecimiento de las cadenas.

## EL ATP, MONEDA ENERGÉTICA DE LAS CÉLULAS

La energía lumínica absorbida por la clorofila no es, en sí misma, útil para las plantas. Deben convertirla en una forma utilizable de energía celular, en una forma de energía química. El trifosfato de adenosina, más conocido como ATP (adenosintrifosfato), proporciona energía a todas las células vivientes, vegetales y animales. El ATP –molécula pequeña, con un tamaño y una complejidad comparables a un eslabón nucleótido de la cadena de ADN– es, de hecho, un nucleótido (monofosfato de adenosina) unido a dos fosfatos adicionales.





Interesa, ante todo, considerar de qué modo se genera el ATP en la célula.

Como se observa en el esquema, el colector de la energía lumínica (clorofila) absorbe la luz y la convierte en electricidad y en ATP durante el proceso de elaboración del hidrato de carbono. Así se almacena y conserva la energía del Sol, en las moléculas de ATP.

Las células animales, naturalmente, no tienen clorofila. Deben generar el ATP a partir de los hidratos de carbono que obtienen al comer las plantas. Las células animales contienen diminutos hornos para hidratos de carbono, donde se queman los hidratos de carbono en presencia de oxígeno para generar ATP.

## COMBUSTIÓN

La diferencia más importante entre una combustión biológica y una combustión ordinaria estriba en que, en esta última, la energía procedente del material consumido —tanto si es carbón, como madera o hidrato de carbono— se libera en forma de calor, mientras que en el proceso biológico la energía procedente del material consumido —el hidrato de carbono— es el ATP. La elaboración del ATP a partir de la combustión del hidrato de carbono por las células animales tiene muchas semejanzas con la del ATP, a partir de la luz, por las células vegetales. La combustión del hidrato de carbono genera una corriente eléctrica, o sea, un flujo de electrones a lo largo de unas moléculas de proteína. De manera semejante, cuando la clorofila ha absorbido algo de luz solar se generan electrones que atraviesan una serie de moléculas de proteína del mismo modo que una corriente eléctrica. En ambos casos, dicha corriente produce la unión de moléculas de fosfato al nucleótido de adenosina y, por tanto, la formación de moléculas de ATP.

Así, tanto en el proceso de captación de la luz solar como en la combustión del hidrato de carbono se generan electrones en movimiento, que, a su vez producen moléculas de ATP.

En las células, estas dos vías principales de elaboración del ATP se desarrollan en el interior de compartimentos con membranas envolventes propias, parecidas a células pequeñas en el interior de las células. En los cloroplastos de las plantas se produce el ATP a partir de la luz solar, mientras que en las mitocondrias de los animales se elabora el ATP a partir de la combustión del hidrato de carbono.

## LAS PLANTAS ELABORAN LOS HIDRATOS DE CARBONO EN PROVECHO PROPIO

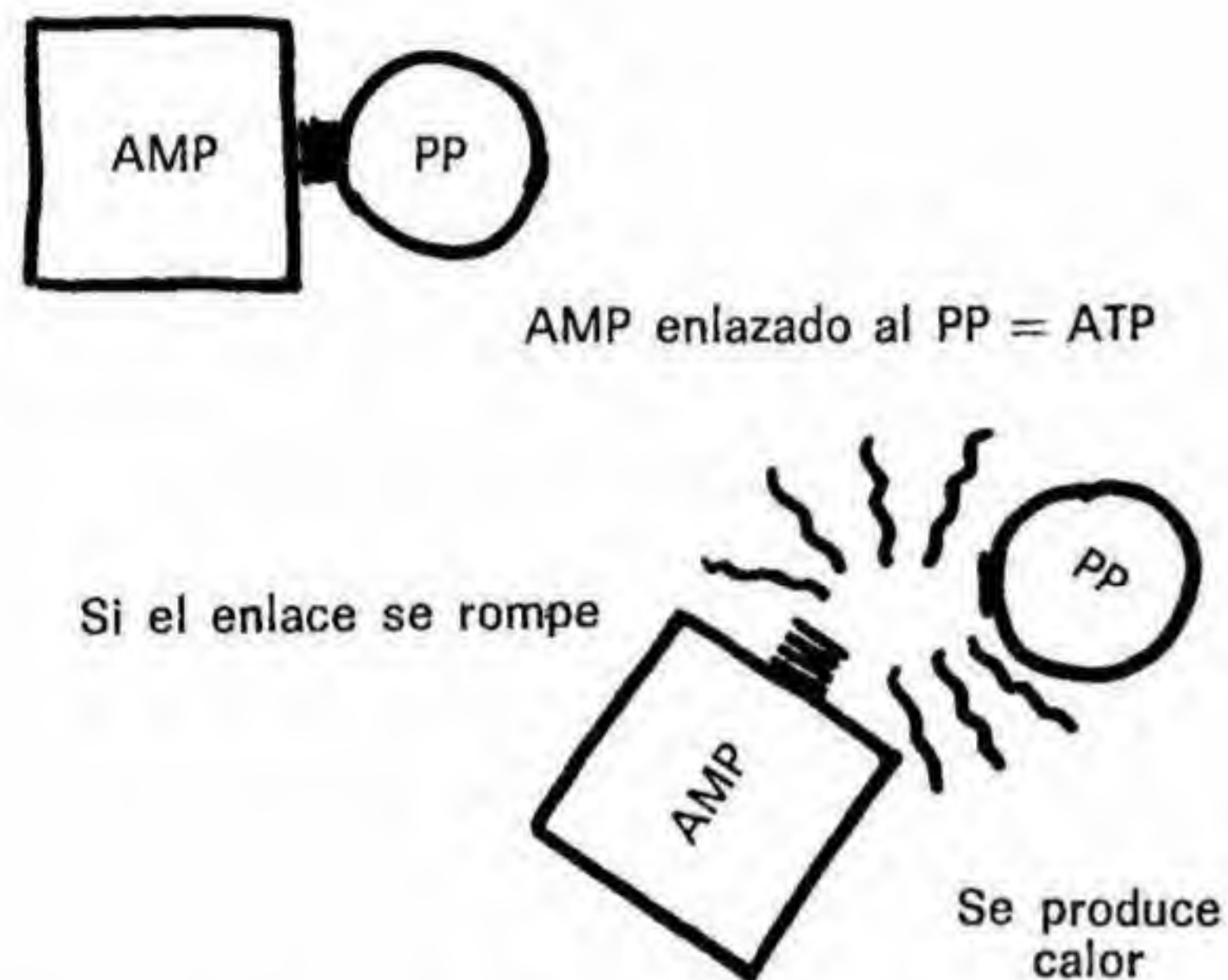
Cabría deducir, de lo anterior, que las plantas elaboran el hidrato de carbono para los animales, pero no es así. El hidrato de carbono es el principal producto del proceso de la fotosíntesis, pero tanto las plantas como los animales necesitan quemar este oxígeno para producir más ATP y otros compuestos para su propio crecimiento, y lo realizan en una especie de hornos para hidratos de carbono del tipo de las mitocondrias. Así, las plantas poseen dos mecanismos de conversión de energía: uno, que utiliza la energía solar para formar hidrato de carbono, y otro, de tipo animal, que emplea el hidrato de carbono para elaborar ATP y con él, la sustancia vegetal.

## COMPOSICIÓN DEL ATP

Ha llegado el momento de analizar más detalladamente el ATP. Para comprender cómo trabaja, he ahí su rasgo principal: está compuesto por una parte grande, el monofosfato de



adenosina o AMP, unida a una parte más pequeña, el pirofosfato o PP, de modo que resulta apropiado escribir AMP-PP para poner de relieve las dos partes y el enlace que las une. El AMP-PP generado en el proceso de combustión del hidrato de carbono contiene energía almacenada en el enlace entre el AMP y el PP, es decir, energía potencial. Eso se demuestra con sólo romper el enlace AMP-PP para formar AMP y PP.



Cuando ocurre esto se produce una minúscula explosión, que libera calor, aunque quizá la mejor manera de demostrar que el AMP-PP almacena energía es tener en cuenta lo que dicha molécula realiza en los sistemas vivientes.

## EL ATP APORTA ENERGÍA A LOS ESLABONES

Al inicio de este capítulo se ha hecho referencia a la explicable alegría del autor por el descubrimiento de cómo se utili-

za la energía del ATP para formar las cadenas de proteína. Ahora se considerará más detalladamente este esencial primer paso.

¿Qué se espera en este sentido del ATP (AMP-PP)? Quien tuviera un puñado de eslabones metálicos y quisiera formar con ellos una cadena, abriría cada eslabón con unos alicates lo engazaría con otro, volvería a cerrarlo y repetiría dicha operación hasta conseguir su propósito. Para ello habría gastado una energía, energía física muscular. El ATP deberá hacer algo análogo a lo realizado con las manos y los alicates.

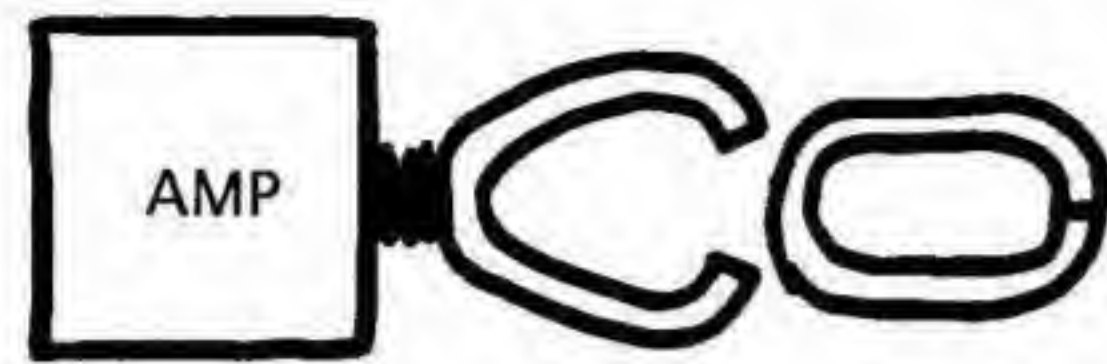
He aquí cómo procede realmente el ATP para engazar los eslabones en cadenas:



Se ha dibujado el AMP-PP en condiciones de reaccionar con un eslabón real, por ejemplo, un aminoácido; y también dos eslabones que se pueden conectar para formar una cadena. Sin duda, resulta evidente que no se pueden engazar sin ayuda.

El primer paso fundamental es un enlace químico real entre la porción AMP del AMP-PP y uno de los eslabones; cuando ocurre esto, queda eliminado el PP: el AMP ha adquirido el eslabón a expensas de su componente PP. Esta reacción mantiene intacta la energía de enlace, que ahora reside en la conexión entre el AMP y el eslabón.



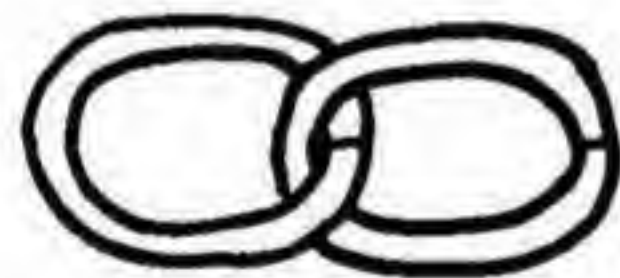


El AMP se une al eslabón  
y lo abre

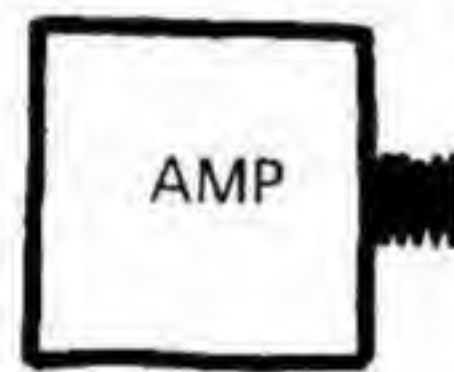
El PP es liberado



Se dice entonces que el eslabón está «activado», lo cual significa que está alterado, o sea, que es receptivo a la reacción con otro eslabón de la cadena; se ha representado esto imaginando que la energía procedente del nuevo enlace abre el eslabón. Al eslabón le resulta incómodo este estado activado, por lo cual «busca» otro eslabón con quien reaccionar. Esto se muestra en la secuencia final, en que ha sucedido la conexión y, simultáneamente, la liberación del AMP.



Eslabones engarzados



AMP liberado

Nótese que el resultado es, por un lado, que dos eslabones separados quedan engarzados y, por otro, que el ATP (AMP-PP) se rompe para dar AMP y PP.

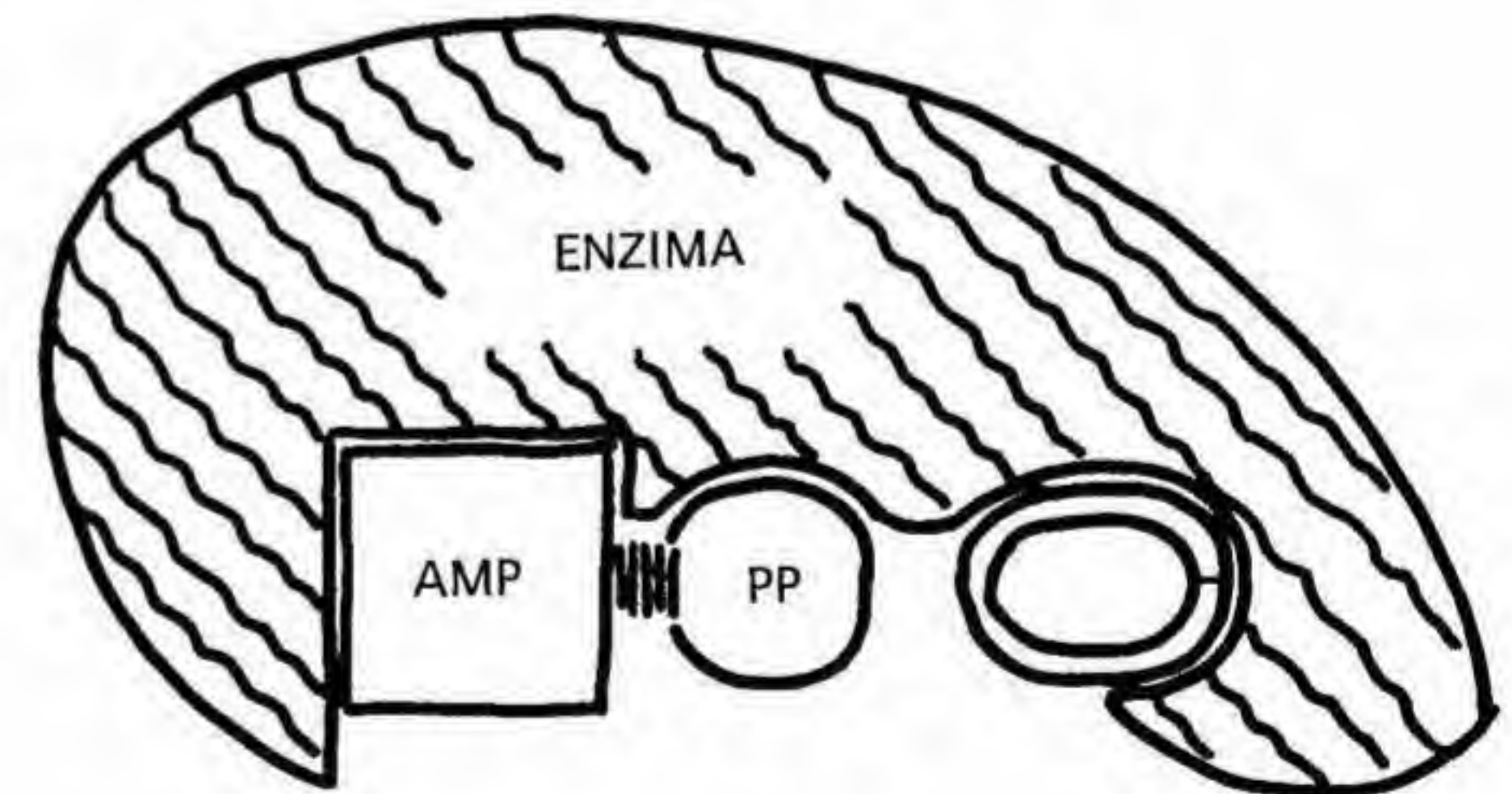
## SE CONSERVA LA ENERGÍA CUIDADOSAMENTE

Obsérvese con qué cuidado se conserva la energía. Si se toma AMP-PP y se rompe químicamente en AMP y PP, la

energía podrá liberarse en forma de calor desprendido. La célula rompe el AMP-PP en AMP y PP –el mismo resultado final– pero utiliza una vía que conserva la energía en un proceso constructivo: el enlazamiento de dos eslabones. En la mitocondria, el AMP puede volver a unirse con fosfatos para formar más ATP, mientras que el PP es dividido por un enzima especial y se producen dos ácidos fosfóricos, que también se pueden utilizar de nuevo.

## NADA ES POSIBLE SIN ENZIMAS

Ahora bien, ninguno de estos fenómenos puede ocurrir sin el concurso de los enzimas. Los enzimas hacen que los fenómenos se desarrollen a velocidades satisfactorias para las necesidades celulares. Los enzimas, que son moléculas proteínicas, cumplen su función de activación reuniendo el AMP-PP y los eslabones en una posición tal que asegure su contacto.



Cuando los compuestos que intervienen en esa reacción están en la adecuada relación mutua, el resto de los fenóme-



nos ocurre con facilidad. Sin enzimas, la proximidad de los participantes en aquélla dependería del azar y requeriría un tiempo desmedido.

## OTRA VEZ EL ARN DE TRANSFERENCIA

Aquí, nos hemos tomado la libertad de alterar la auténtica secuencia de acontecimientos para intentar aclarar cómo participa el ATP en el proceso de formación de las cadenas de proteína. Ahora, dejaremos las cosas en su sitio. Tras haberse activado o «abierto» un eslabón —un aminoácido—, queda inmediatamente conectado al engarzarse al AMP, no a otro eslabón aminoácido, tal como se ha sugerido. En el capítulo 2 se dijo que los aminoácidos deben unirse a los ARNt para conseguir una identidad tal que permita que el ARN mensajero pueda reconocerlos.

Sólo después de que los aminoácidos hayan quedado colocados ordenadamente en el ribosoma, la máquina de leer mensajes, están en condiciones de reaccionar con su aminoácido vecino. De modo que lo antes expuesto es, en principio, correcto, pero sucede exactamente que el eslabón dispuesto a reaccionar —el eslabón «abierto»— es transferido al ARNt, todavía abierto, y establece una ligazón con el siguiente eslabón sólo después de haber sido colocado debidamente en el ribosoma.

Nótese cuán ingenioso es el mecanismo. El proceso de activación hace al eslabón —un aminoácido— capaz de reaccionar con cualquier otro eslabón, pero esto no sucede; los eslabones sólo se enlazan después de haber sido colocados en el orden adecuado. Esta ordenación requiere la unión de cada aminoácido con su ARNt específico. El enzima que activa —abre— el aminoácido también lo une, en su posición abierta, al ARNt apropiado.

Ahora queda claro, pues, de qué manera se utiliza la energía para juntar los eslabones de las moléculas de proteína de todos los sistemas vivientes. Las proteínas constituyen la principal sustancia material de la vida y representan, por tanto, una enorme mina no sólo de información sino también de energía ya que cada enlace guarda la energía procedente del ATP. Se emplean principios similares para unir los eslabones de las moléculas de ADN y de ARN así como de otros tipos de moléculas.

## EL ATP LO HACE FUNCIONAR TODO

Finalmente, se puede sacar alguna conclusión sobre cuán extendido está el ATP en los sistemas vivientes. Es, en realidad, la unidad universal de intercambio de energía. Hasta aquí nos hemos limitado a hablar de su empleo en la formación de las cadenas moleculares; sin embargo, y poniendo al hombre como ejemplo, sólo utilizamos diariamente alrededor del 10 % de ATP para este propósito. La mayor parte del resto se aprovecha para hacer que los músculos se muevan, de manera que el ATP proporciona la energía para que los filamentos musculares puedan deslizarse unos sobre otros, lo cual produce la contracción muscular. Otros procesos que implican movimiento —como, por ejemplo, el transporte de sustancias químicas a través de la membrana— requieren ATP. Sin embargo, para quien esto escribe, uno de los usos más llamativos del ATP, y uno de los que mejor ilustra su mecanismo de acción, es la ignición de la linterna de la luciérnaga. La emisión de luz —cualquier luz— requiere energía: en una linterna la suministra una pila, en la luciérnaga la proporciona el ATP. Se trituran algunas luciérnagas con agua, se eliminan los desechos corporales y se deposita la solución de proteínas de luciérnaga en un tubo de ensayo. Se añade una



minúscula cantidad de ATP y se coloca este tubo en un lugar oscuro itodo el tubo resplandecerá! Cuando la luz haya decaído, más ATP lo hará resplandecer de nuevo, y así de modo indefinido. El estudio de este sistema revela que su mecanismo es, en esencia, idéntico al descrito para la formación de las cadenas. El ATP une su parte de AMP a una proteína y la energía transferida a la proteína provoca su cambio de configuración. Esta proteína especial emite luz cuando cambia su configuración. Nuestro colega William McElroy descubrió estos fenómenos con la ayuda de cientos de muchachos, a los que daba un penique por cada centenar de luciérnagas. Esto era hace veinte años. Ahora podemos comprar botellas de colas de luciérnaga (linternas) a menos precio a los suministradores de materiales de laboratorio.

Se ha considerado de qué manera la información y la energía trabajan conjuntamente para efectuar la tarea fundamental de formar cadenas. Se ha tratado, asimismo, de cómo, en la medida en que se conocen, tales procesos pudieron haberse originado en la Tierra. Ahora se estudiarán las fuerzas subyacentes en la naturaleza que, actuando desde aquellos sencillos inicios, han producido la elaborada complejidad actual de la vida presente en la Tierra, tres mil millones de años después.

## 5. Cambio

Durante el brillantísimo período del descubrimiento de los principios de la vida antes descritos, el pensamiento y la práctica de la genética y de la evolución en la Unión Soviética estuvieron controlados por un charlatán: T. D. Lysenko, científico poco capaz aunque brillante polemista, persuadió a Stalin y posteriormente a Kruschov de que los caracteres adquiridos podían heredarse y que los científicos que pensaban otra cosa debían ser condenados al silencio; y lo fueron, desde mediados del decenio de 1930 hasta mediado el decenio de 1960. Durante este período, el gobierno, siguiendo las teorías de Lysenko, intentó adaptar plantas tropicales a crecer en el Ártico y forzó al trigo de invierno a desarrollarse en regiones de trigo primaveral, asolando con ello la producción agrícola rusa. De modo incidental, los conceptos de Lysenko rechazaban por completo el papel del ADN como base material de la herencia.

Nos acordamos de este ridículo monumento al disparate contemplando un partido de baloncesto. De repente se nos vino Lysenko a la memoria. ¿Nos habría ordenado pensar que los jugadores de baloncesto se habrían estirado como resultado del juego, y que, en consecuencia, producirían descendientes más altos? Si cada nueva generación jugara al baloncesto, ¿deberíamos ir elevando las canastas hasta el techo?



Es comprensible la popularidad que alcanzó en el gobierno soviético el concepto de la herencia de los caracteres adquiridos, ya que significaba que se podían mejorar los cultivos si se condicionaban las semillas y halagaba, por otro lado, al deseo humano de influir en nuestro propio desarrollo y transmitir cualidades a nuestros propios hijos.

Sin embargo, la realidad es más dura. La altura de los jugadores profesionales de baloncesto se debe totalmente al azar, a un proceso aleatorio que hace que algunas personas sean más altas que otras, y se escogen a las altas como las más aptas para jugar al baloncesto.

En este capítulo y en el siguiente se estudian el cambio y el azar, origen de la diferencia y variación entre los seres vivos y de la manera como el ambiente elige las formas de vida que podrán sobrevivir. Durante la larga historia de la vida la flexibilidad y la adaptabilidad –mutabilidad– han sido un valioso capital. En el ambiente generalmente hostil y siempre cambiante de la superficie de la Tierra, cambio y supervivencia han sido sinónimos.

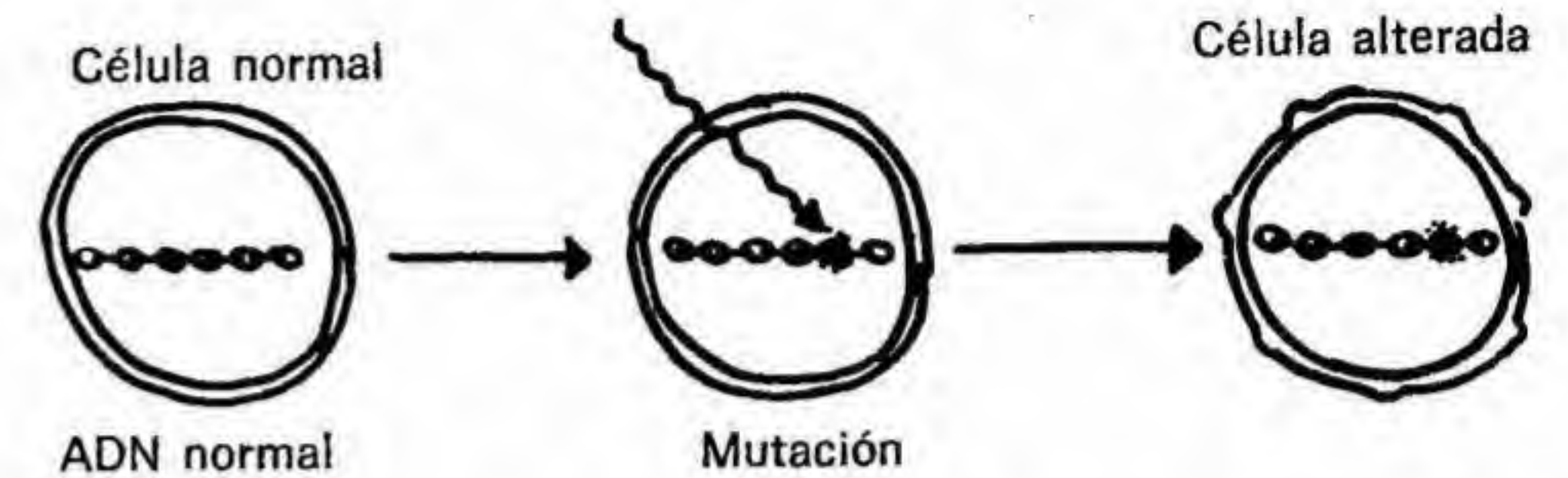
Se trata, claro está, de evolución, el proceso que nos ha originado, tanto al autor como al lector, a la gallina y al huevo, al jugador de baloncesto y a todas las demás criaturas terrestres hasta el presente a partir de aquella sencilla célula primitiva.

Hay dos formas por las cuales los seres vivos han podido cambiar a lo largo de la evolución: la mutación del ADN y la mezcla sexual de sus ADN.

El cambio del ADN de un organismo producirá, obviamente, cambios en el propio organismo, de modo que el destino de ese organismo dependerá de cómo manipula su ambiente. Esto, es decir, el proceso de la selección, se examinará en el capítulo siguiente.

## MUTACIONES

Una mutación es un cambio de uno o más de los cuatro nucleótidos que constituyen los eslabones del ADN.



Un cambio en un eslabón significa un cambio en una letra del mensaje del ADN. El ARN mensajero copiado de este ADN también presentará dicho cambio y lo leerá de manera diferente la maquinaria de formar proteínas. El resultado será una proteína alterada, un eslabón de la cadena –un aminoácido– será distinto, y consecuentemente, cambiará la función de la proteína.

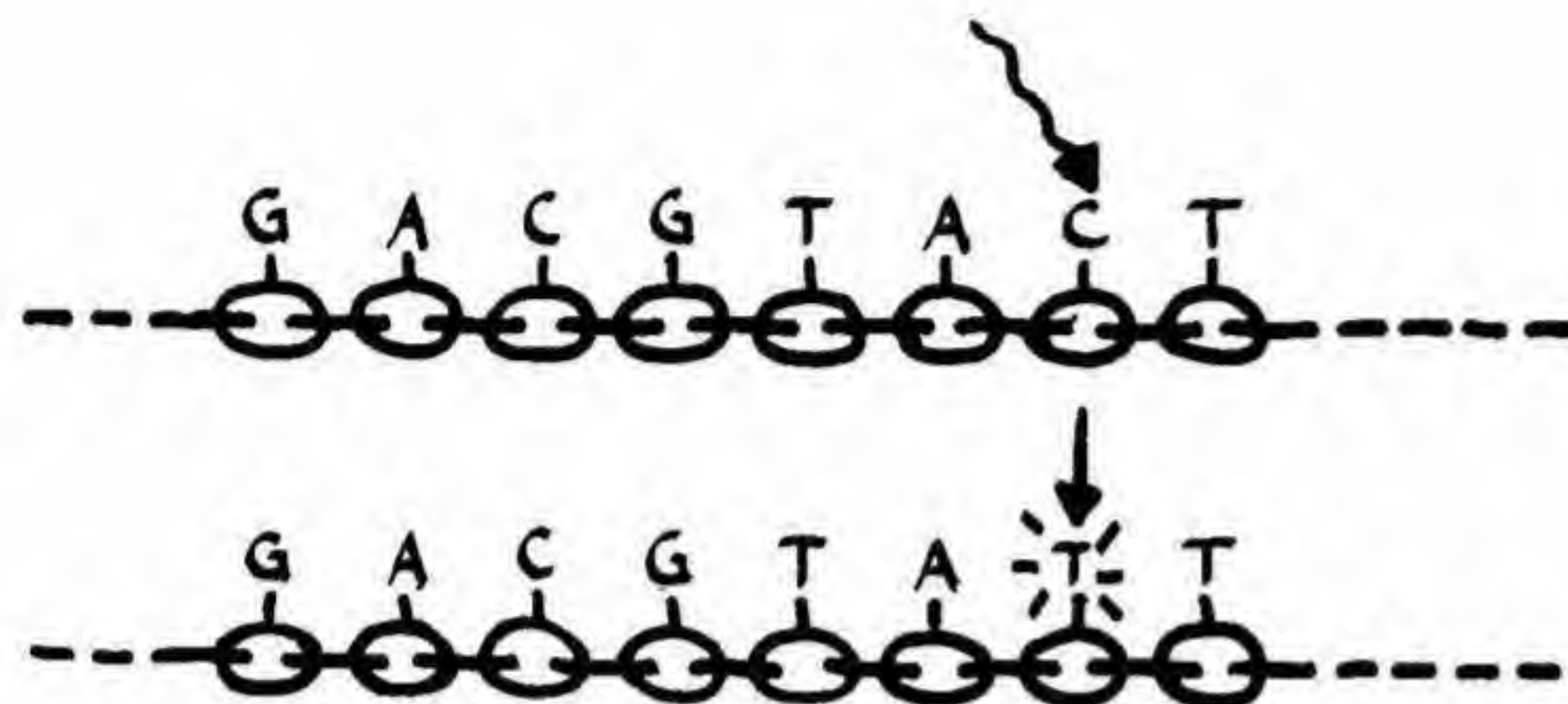
Las mutaciones presentan una característica muy importante: son copiadas cuando se copia el ADN. Antes de la división celular, un enzima copia el ADN, nucleótido por nucleótido, hasta que se origina una copia completamente nueva de los genes, de modo que la mutación en el ADN se copiará a menudo, se perpetuará el error y se propagará a todas las siguientes generaciones de células que contengan aquel ADN. Así se inscribe para siempre una pequeña mutación en el lenguaje del ADN.

## CAUSA DE LAS MUTACIONES

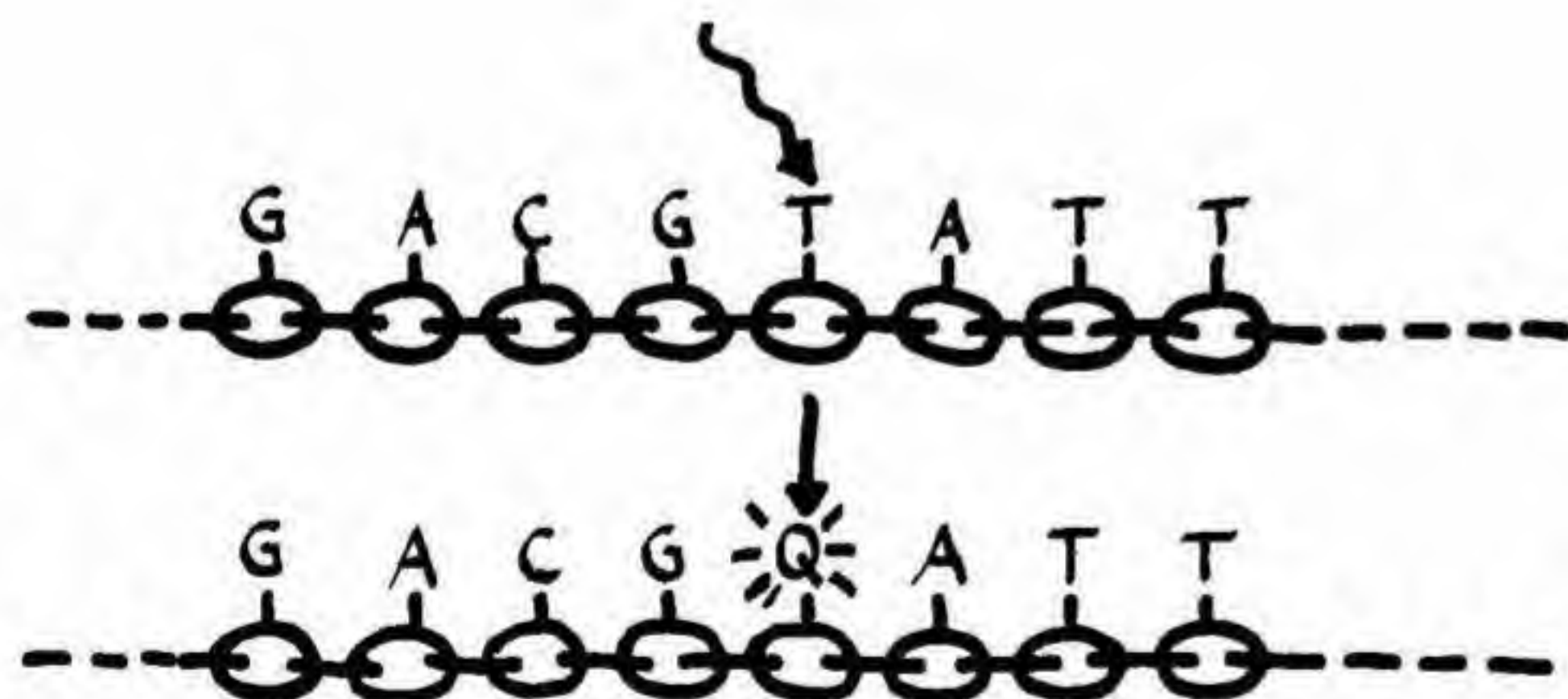
Causan las mutaciones las radiaciones naturales (tales como los rayos X y la luz ultravioleta) y determinados pro-



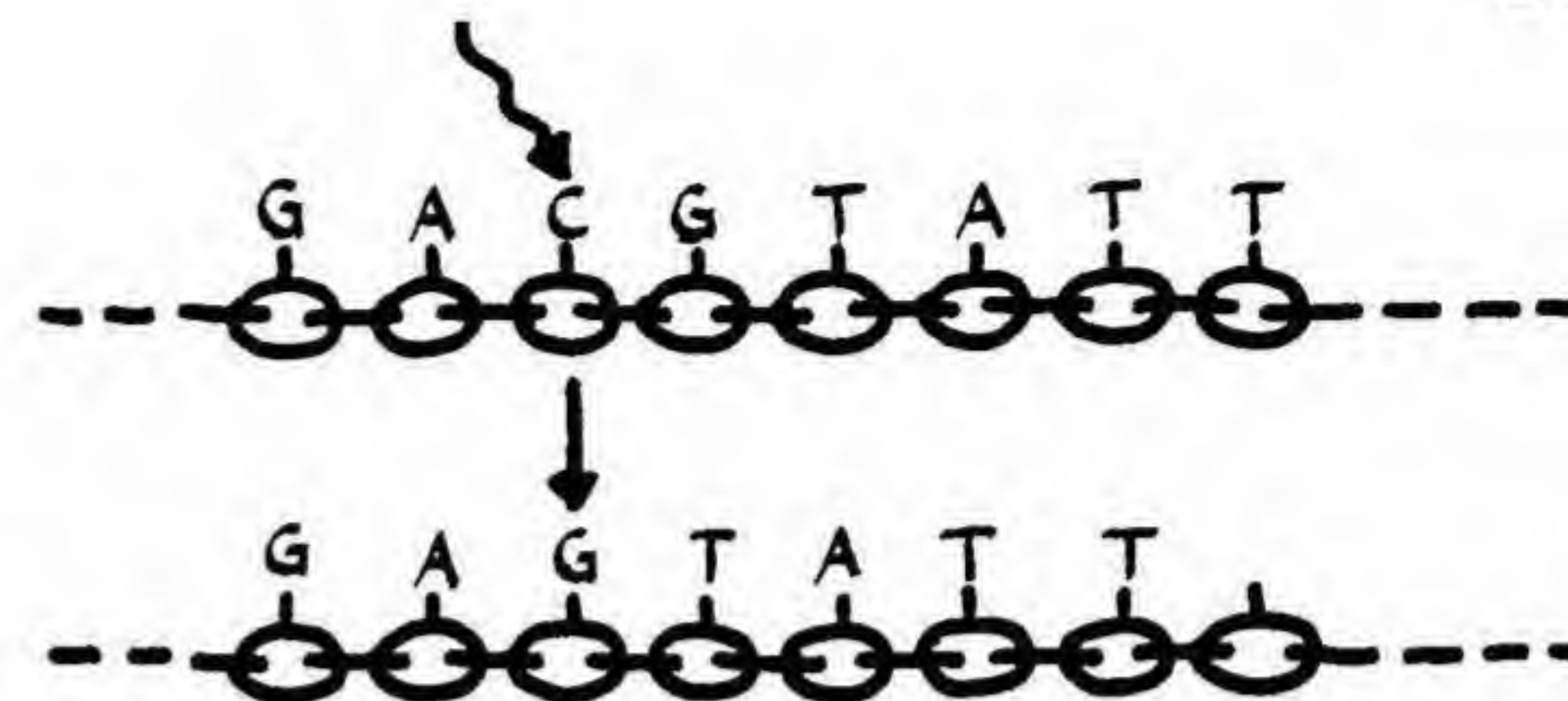
ductos químicos fabricados por el hombre, que alteran y dañan a los nucleótidos que constituyen los eslabones del ADN. De este modo, los nucleótidos pueden transformarse en otros nucleótidos,



o quedar alterados químicamente hasta una forma que no sea ninguna de los cuatro nucleótidos estándares,



o incluso pueden ser eliminados de la cadena.



Todas estas alteraciones modifican, obviamente, el significado de la cadena; en adelante, el lenguaje es ligeramente distinto.

Las mutaciones son, en realidad, acontecimientos fortuitos. No hay modo alguno de saber qué eslabones quedarán afectados. En cualquier momento, las mutaciones pueden afectar a cualquier nucleótido del ADN de toda criatura viviente, incluido el hombre. (Existen unos enzimas, muy precisos, que cuidan constantemente el ADN y cuando encuentran un cambio, lo reparan!, aunque no pueden con todos.)

### **LAS MUTACIONES AFECTAN A LAS CÉLULAS CORPORALES DE MODO DISTINTO DE COMO LO HACEN A LAS CÉLULAS SEXUALES**

Todas las células corporales del hombre contienen dos dotaciones enteras de ADN: una procedente de su madre y otra proveniente de su padre. Para engendrar un hijo, los padres depositan su ADN en células individuales cuya única función es la de aparearse, esto es, unirse con una célula del sexo opuesto y juntar sus ADN. Estas células individuales especializadas son los espermatozoides, formados en los testículos de los machos, y los óvulos, elaborados en los ovarios de las hembras.



Cuando se produce una mutación en el ADN de una célula corporal humana –que no está en crecimiento y forma parte de los miles de millones de células que constituyen la estructura total del hombre– lo más probable es que nunca se sepa. Difícilmente se puede percibir el daño causado a una célula entre miles de millones de ellas. (Existe, sin embargo, una importante excepción: la mutación que produce que una célula se vuelva cancerosa, extremo que se considerará en el último capítulo.) Cuando se produce una mutación en una célula del testículo o del ovario, que está produciendo espermatozoides u óvulos para formar nuevos individuos, la situación es bastante distinta, ya que si un espermatozoide o un óvulo contiene una mutación, dicha mutación pasará, sin duda, al huevo fecundado; cuando este huevo fecundado o cigoto se divide, la mutación será copiada en todas las células descendientes. De modo que todas las células corporales del adulto resultante tendrán una copia de la mutación. Y todas las células sexuales de dicho adulto que formen espermatozoides u óvulos, en los testículos o en los ovarios, respectivamente, mostrarán también la mutación.

### MUTACIONES «BUENAS» Y MUTACIONES «MALAS»

Las mutaciones son raras pero han sido instrumentos esenciales del cambio evolutivo. Han producido cambios en las proteínas de los organismos que les han conferido alguna ventaja en sus relaciones con el ambiente. En este sentido, las mutaciones han sido beneficiosas, y no hay razón alguna para pensar que este proceso no siga actuando, es decir, que continúe alterando el ADN para proporcionar a las criaturas actualmente vivientes, incluido el hombre, algunas proteínas ligeramente mejoradas, que realicen mejor su función. Las mutaciones beneficiosas no son, por lo general, fáciles de descubrir. Es probable que no se detecte una mutación del ADN

que altera un aminoácido de una proteína que así trabaja mejor, que resulta muy complicado medir tales pequeñas mejoras.

Pero la mayoría de las mutaciones, al menos las detectables, son perjudiciales. Contrariamente a lo que sucede con las mutaciones beneficiosas, las perjudiciales son fáciles de detectar porque se manifiestan como un defecto, una debilidad, una enfermedad. Se descubren, casi a diario, nuevas enfermedades humanas producidas por mutaciones. Existe un gran número de dichas enfermedades, poco frecuentes individualmente. En cada caso, la causa de la enfermedad estriba en una mutación de la célula sexual, cambio que se ha transferido, en forma de espermatozoide o de óvulo, a la generación siguiente, en la cual todas las células del cuerpo han copiado la mutación. Un ejemplo, el mejor estudiado, es el de la anemia falciforme. Aquí, la mutación del ADN se produce en el gen que especifica la molécula proteínica denominada hemoglobina. La hemoglobina forma parte de los glóbulos rojos sanguíneos humanos y transporta el oxígeno desde los pulmones a las células del cuerpo. La mutación del ADN, copiada en el ARN mensajero alterado, ocasiona que los glóbulos rojos formen moléculas de hemoglobina defectuosas, en que sólo cambia un aminoácido en dos de las cuatro cadenas de que consta cada molécula. Dicho cambio altera la forma de la molécula de hemoglobina. Estas numerosas moléculas de hemoglobina defectuosa deforman la membrana del glóbulo rojo haciendo que la propia célula se desfigure, y a veces recuerde el aspecto de una hoz. Estos glóbulos rojos deformes se atascan en el interior de los vasos sanguíneos y pueden causar una grave enfermedad.

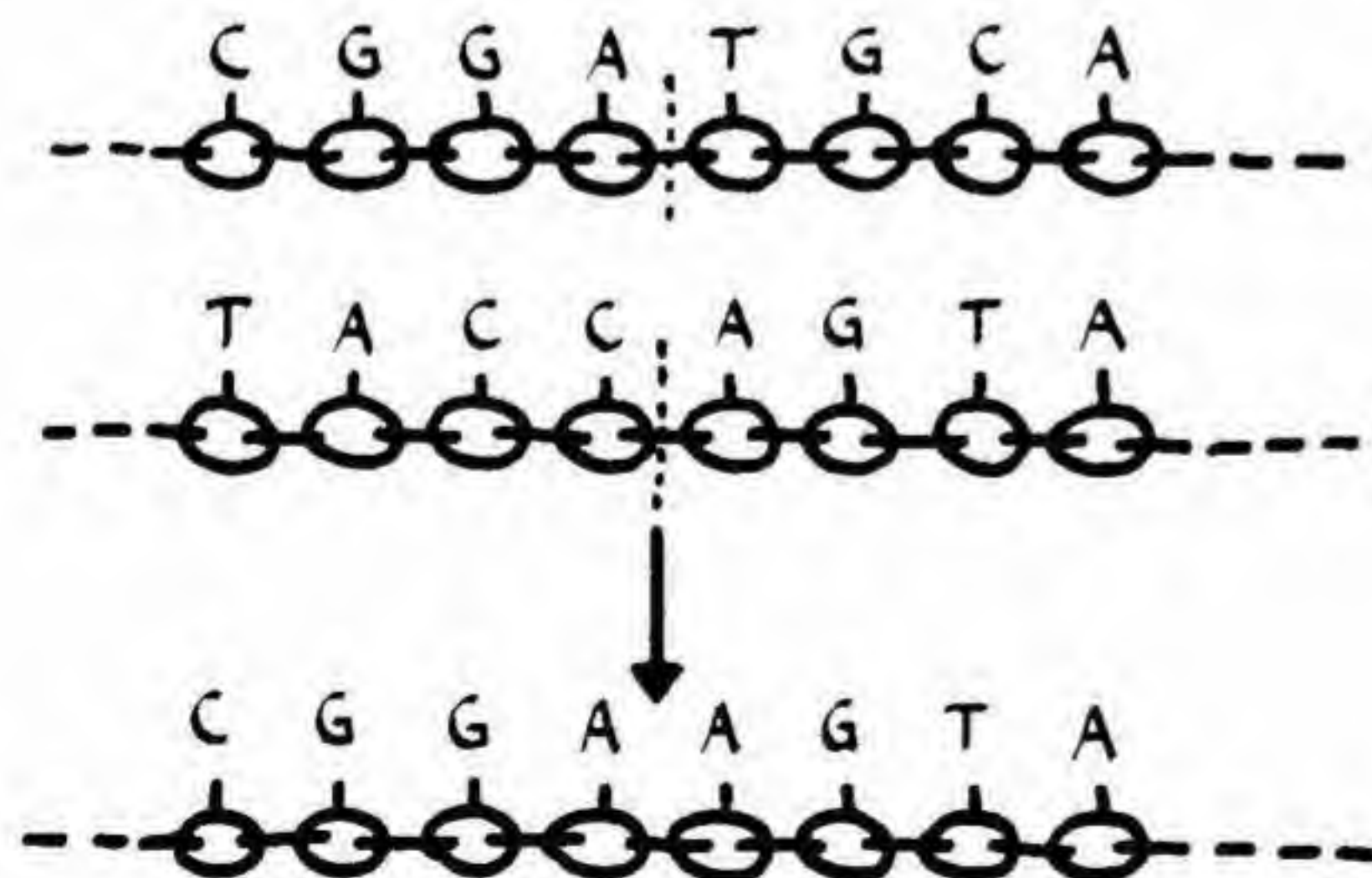
Quizá no debería sorprender que casi todas las mutaciones sean perjudiciales. Basta con fijarse en esto: la información que poseen los organismos que viven actualmente –la obra acumulada durante tres mil millones de años de evolución– es bastante más perfeccionada que la suma de las obras



de todos los grandes poetas. Es remota la posibilidad de que un cambio fortuito en una letra, palabra o frase mejore el texto. Es muy probable, por el contrario, que un cambio al azar resulte perjudicial. Por esta razón, muchos biólogos contemplan con espanto la proliferación de armas nucleares, de centrales de energía nuclear y de industrias productoras de agentes mutágenos (productores de mutaciones). El conjunto del ADN terrestre es un legado inconmensurablemente precioso e irremplazable, por cuanto la evolución jamás puede repetirse. El daño a la obra de tres mil millones de años de evolución sería una atrocidad monstruosa, más espantosa que la destrucción de todas las grandes obras de los artistas mundiales de talla.

## MEZCLA SEXUAL DEL ADN

Las mutaciones son, por tanto, cambios, acontecimientos poco distintivos, casi siempre perjudiciales, aunque con el suficiente cambio del ADN para tener un valor en cuanto a la evolución. Sin embargo, se necesitaba algo mejor, capaz



de modificar el ADN sin el riesgo de dañarlo. En teoría, cambiar el ADN por su mezcla con otro ADN distinto quizá lo conseguiría. Si dos células distintas pudieran juntarse y recombinar su ADN de tal manera que los genes de una pudieran enlazarse directamente con los de la otra y, en consecuencia, formar descendientes con genes de ambas, se habría avanzado muchísimo.

La gran ventaja de este método de modificar el ADN residiría en que el cambio se conseguiría introduciendo un segmento de ADN (gen) que ya se había comprobado que era beneficioso en cuanto a la evolución. El cambio sería, por tanto, generalmente «bueno», debido a que el ADN de ambos participantes ya habría sido probado anteriormente con la prueba que señala que ha habido éxito en cuanto a la evolución: la supervivencia. Por el contrario, una mutación del ADN suele ser más dañina que beneficiosa.

## FUSIÓN CELULAR

En algún lugar, en un remoto pasado, debió acontecer algún tipo de unión del ADN de dos células. Presumiblemente, las células de aquella sopa primitiva habían experimentado, en sus frecuentes contactos, uniones ocasionales de suficiente duración para permitir la mezcla de sus contenidos. Esto significa que, en la zona de contacto, la envoltura membranosa de cada una de las células se rompía para permitir que los contenidos se mezclaran. El comportamiento de la gran célula única resultante sería entonces dirigido por las proteínas de ambas células, y los ADN de aquellas dos células pasarían a formar parte de una célula única.

Algo muy parecido sucede tal como se muestra en la figura de la página 71. Se pueden cultivar juntas células de distintas partes del cuerpo, o incluso de distintos animales —por ejem-



plo, células humanas y células de pollo— y ser inducidas, en el laboratorio, a fusionarse. La célula resultante contiene doble cantidad de ADN, y las células hijas resultantes de su división contienen también a menudo doble cantidad de ADN.

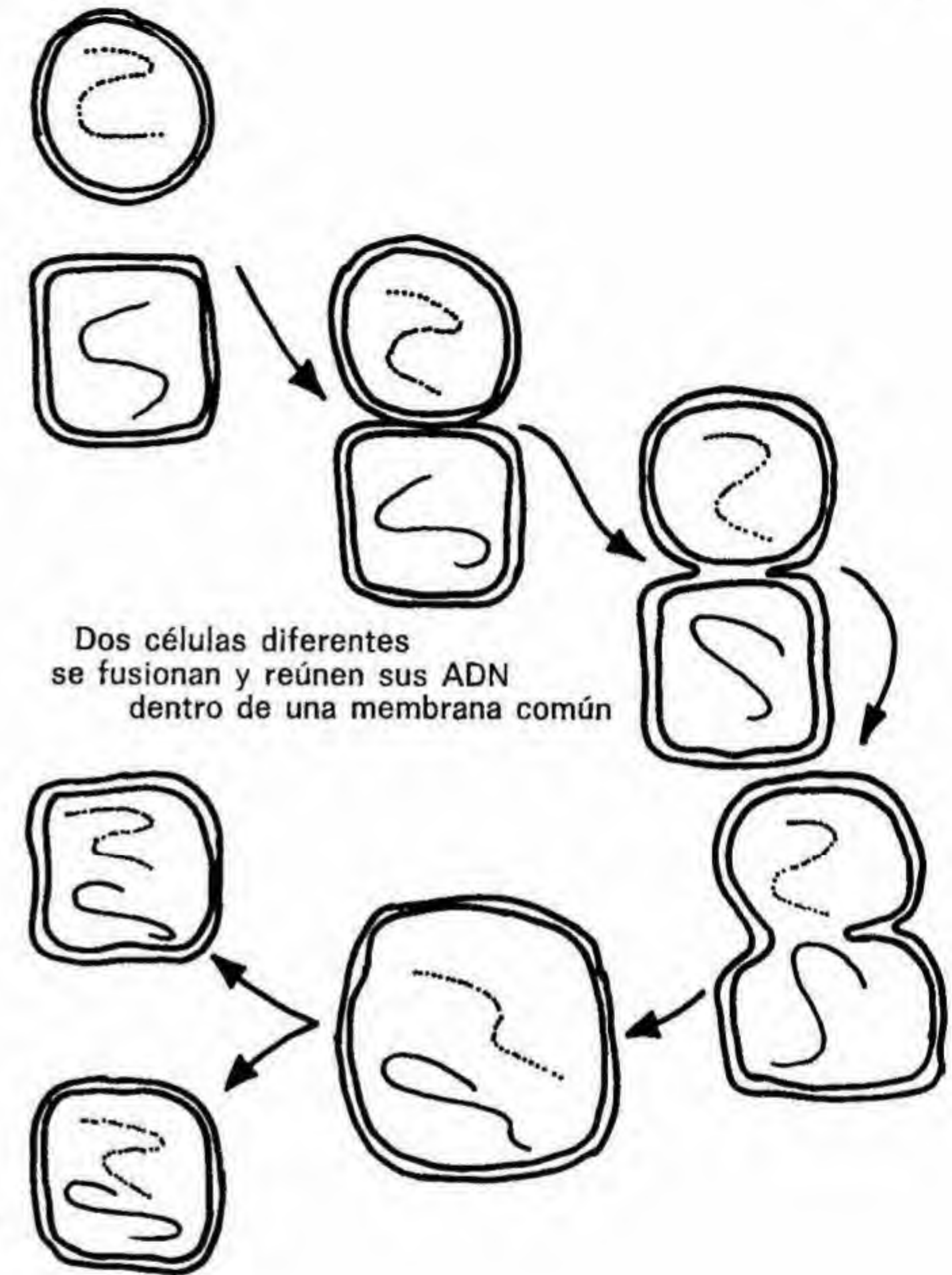
## EL NACIMIENTO DEL SEXO

La existencia del proceso de fusión entre dos células sugiere que éste pudo haber sido un método primitivo de reunir el ADN de una célula con el ADN de otra. Además, cabe considerar que este proceso marca el nacimiento del sexo, y que es uno de los pasos más importantes de la evolución, con una importancia comparable a la de la aparición de la fotosíntesis.

La siguiente fase, que probablemente ocurrió mientras las células todavía permanecían solas y se mantenían en la sopa, fue hacer más posible el acontecimiento, es decir, que el contacto entre las células fuera más específico y más factible. Aunque el contacto célula-célula continúa siendo un acontecimiento fortuito, si algunas células se convertían en más adecuadas para otras por medio de algún rasgo complementario de su «piel», sería más probable que permanecieran juntas. La aparición de la complementariedad en la relación célula-célula significa el nacimiento de dos poblaciones distintas de células: una presenta características elementales de masculinidad, y la otra, de feminidad.

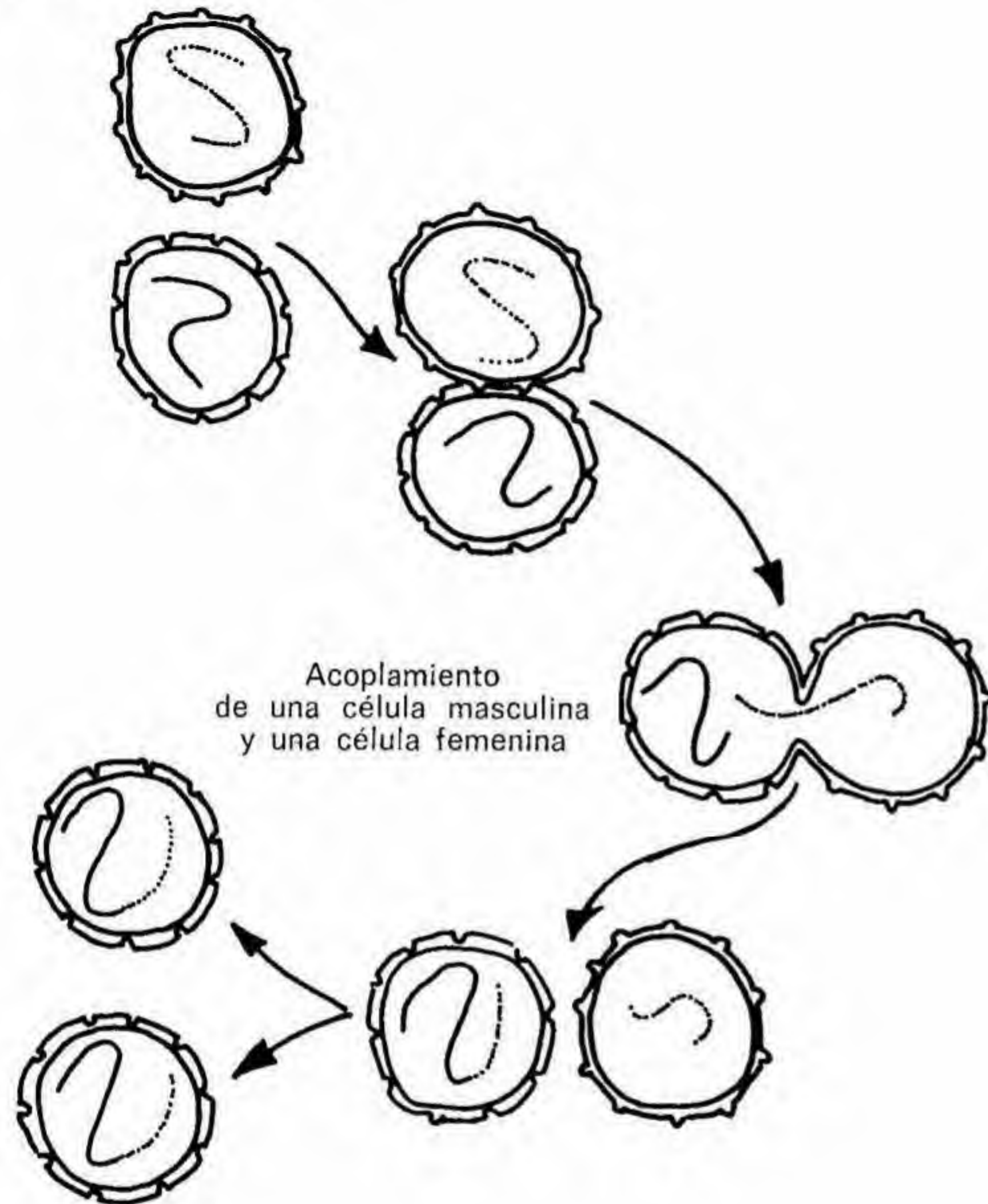
## APAREAMIENTO BACTERIANO

La contrapartida de este fenómeno es el apareamiento sexual de las bacterias, tal como puede estudiarse actualmente en el laboratorio. Probablemente es muy parecido a como fue en las primeras etapas de la evolución. Algunas células bacte-



rianas presentan la característica de masculinidad o de donantes, y otras, la de feminidad o receptoras. Las superficies membranosas de ambos tipos son complementarias y, en consecuencia, mutuamente atractivas (por ejemplo, si una presenta salientes, la otra tiene depresiones, como se aprecia en la ilustración de la página 72). Cuando se juntan células de





sexo opuesto se establece un túnel a través de las membranas en contacto, por el cual se relacionan los interiores celulares. Entonces, la bacteria masculina o donadora proyecta su ADN a la hembra o bacteria receptora, a través del túnel. Este proceso ocurre con relativa rapidez y dura cerca de dos horas, durante las cuales se completa el paso de todo el ADN masculino hacia la hembra; aunque el apareamiento cesa, por lo

general, espontáneamente después de que sólo una parte del ADN masculino ha penetrado en la hembra. El ADN femenino permanece intacto en su interior. En el laboratorio se logra separar a los participantes agitando vigorosamente la solución en que se encuentran. De esta manera es posible controlar exactamente cuántos genes del macho entrarán en la hembra. Aquí conviene destacar que los genes que entran en la hembra pasan a formar parte de su patrimonio informativo. Los genes masculinos quedan incorporados al lado de los genes femeninos. Cuando posteriormente por división celular la bacteria se escinda, las células hijas contendrán los genes tanto del macho como de la hembra, y así de generación en generación.

De esta manera apareció el sexo. El apareamiento de las bacterias ilustra gráficamente la finalidad del sexo: la recombinación del ADN de diversas procedencias.

## EL SEXO, MÁS ALLÁ DE LA CÉLULA ÚNICA

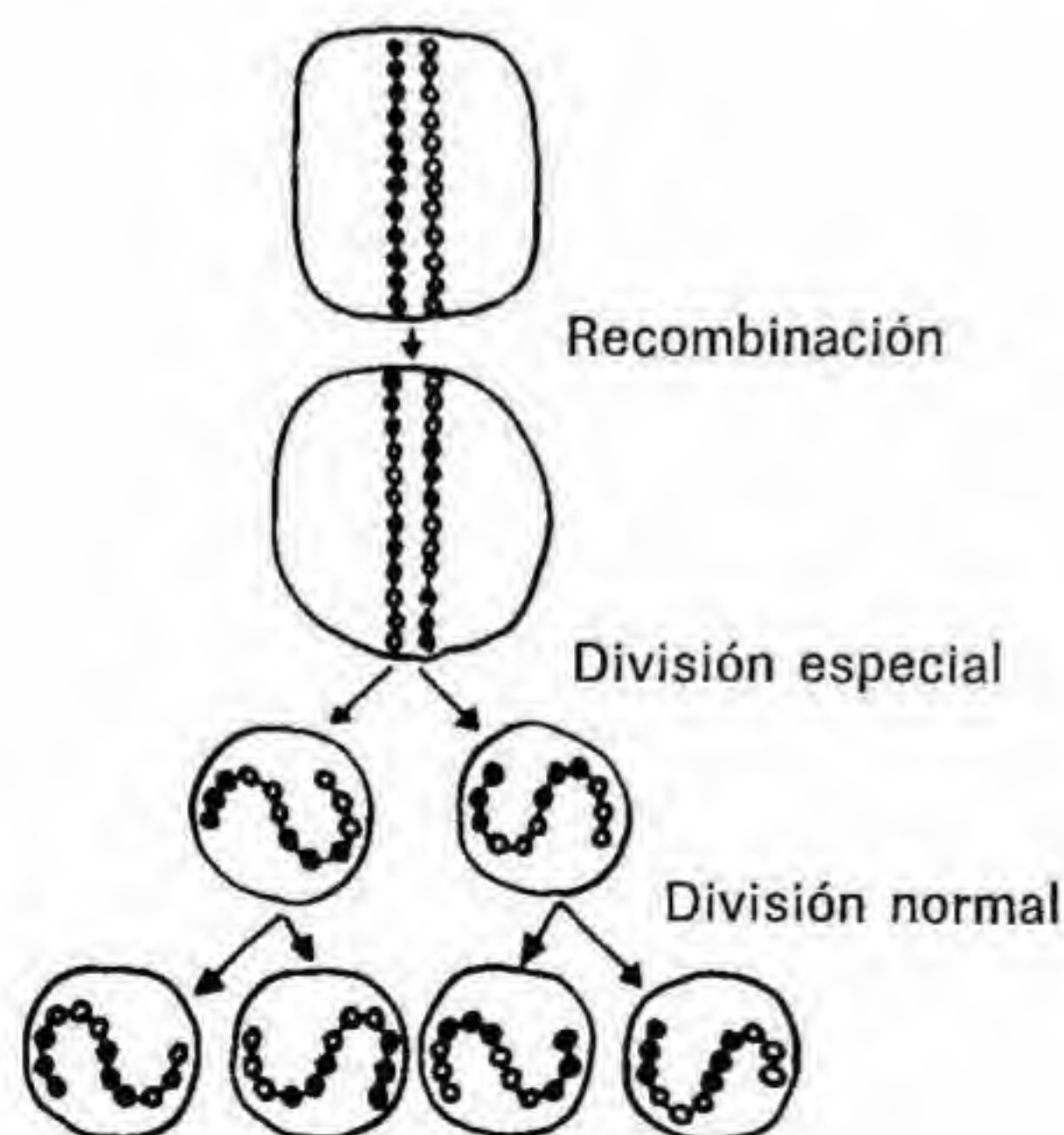
A medida que la complejidad de los organismos rebasó la fase de células individuales, resultó imposible la mezcla del ADN por simple fusión de dos células. Se necesitaron formas especiales de recombinar sexualmente el ADN.

El objetivo continuaba siendo el mismo: juntar una célula que contuviera el ADN de un organismo con otra célula que contuviera el ADN de otro organismo. Para ello aparecieron órganos especiales, el ovario en la hembra y el testículo en el macho, y cada uno de estos órganos produjo células individuales. Al igual que en las bacterias, estas células estaban estructuradas de tal modo que cuando se encontraban se unían, de manera que su ADN podía así fusionarse en el de una célula única: el óvulo fecundado por el espermatozoide, es decir, el cigoto.



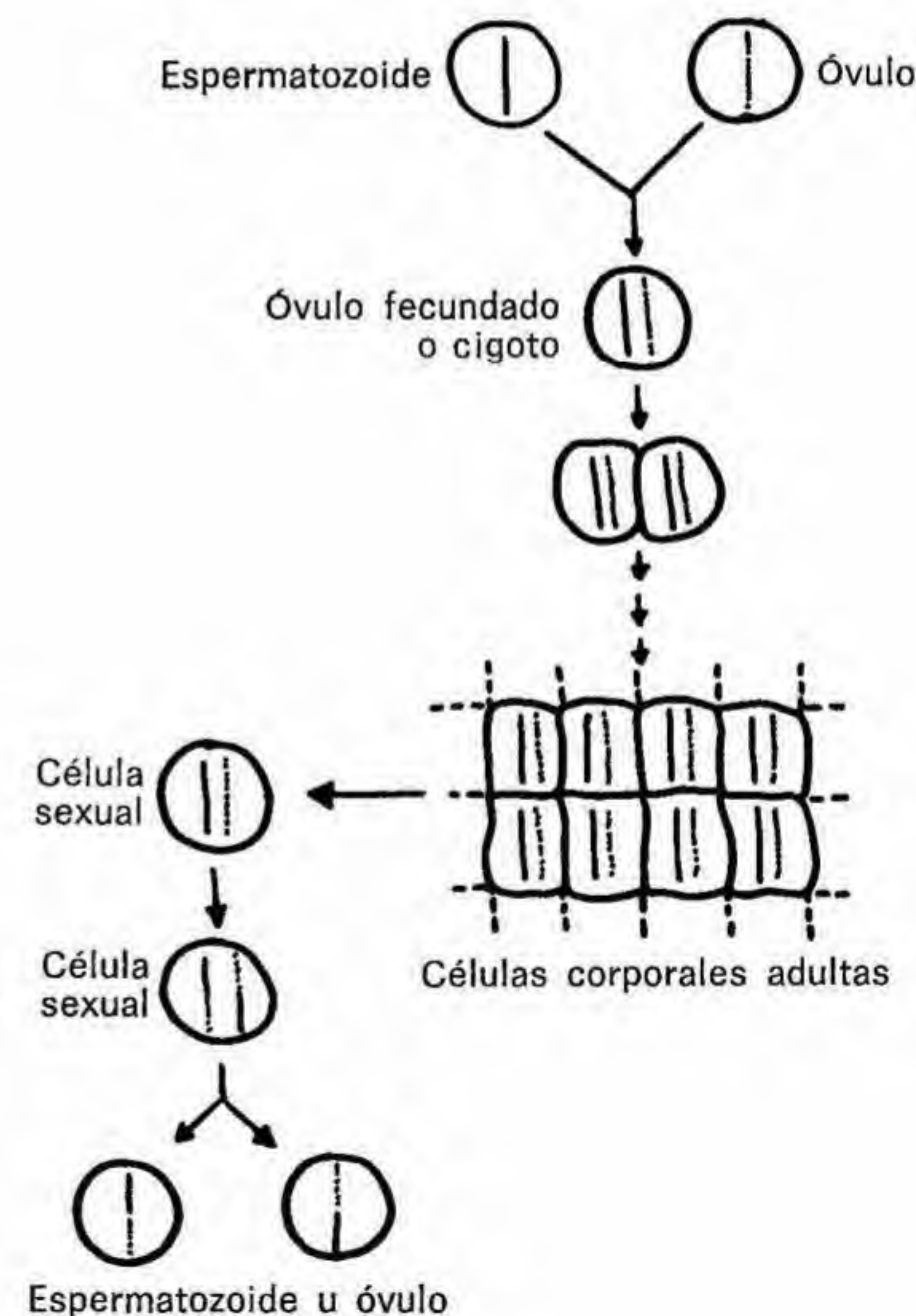
Ahora bien, todas las células corporales contienen idénticas dotaciones dobles de ADN –una dotación procedente de la madre y otra del padre. Si tanto el espermatozoide como el óvulo llevaran dos dotaciones completas de ADN (una procedente de cada progenitor), tal como sucede con las células corporales, la unión del espermatozoide y del óvulo produciría un nuevo individuo cuyas células poseerían cuatro dotaciones completas de ADN, situación por completo imposible. Es lógicamente necesario, por tanto, que la cantidad total de ADN que contienen las células corporales sea reducida a la mitad antes de transferirla al espermatozoide o al óvulo. Este proceso vital se desarrolla en los testículos y en los ovarios, donde las células que contienen las dos dotaciones completas de ADN (una procedente del padre y otra, de la madre) se mezclan o recombinan de modo que se forman dos nuevas dotaciones de ADN en las que los genes del padre y los de la madre están íntimamente mezclados.

Así, cuando estas células se dividen, un ADN mezclado va a una célula hija y el otro a otra célula hija. Estas células hijas



son los espermatozoides en el macho y los óvulos en la hembra, de modo que cada espermatozoide o cada óvulo aportan una dotación completa de ADN, en la cual los rasgos paternos y maternos se encuentran mezclados al azar y cuando el espermatozoide y el óvulo se unen, la célula huevo o cigoto resultante vuelve a contener dos cargas, o dotaciones, completas de ADN.

Este proceso vital no es fácil de entender; por ello se repasa de nuevo, con la ayuda de un esquema, que empieza por la fecundación o unión del espermatozoide y el óvulo.





1. Tanto el espermatozoide como el óvulo contienen una dotación completa de genes.

2. El espermatozoide y el óvulo se unen para formar el cigoto o célula huevo, con una dotación completa de genes procedente de la madre y otra dotación completa procedente del padre.

3. El cigoto se divide, y la división celular continúa hasta alcanzar el estado adulto, en miles de millones de células, que todas presentan la misma doble dotación de genes que el cigoto: una dotación procedente del padre y otra, de la madre.

4. En las células sexuales de los testículos y de los ovarios del adulto a) la dotación genética de la madre se mezcla con la dotación genética del padre y b) las células sexuales se dividen de una forma especial confiriendo una dotación genética mezclada (del padre y de la madre) a cada célula hija. Estas células hijas se transforman en espermatozoides o en óvulos, dispuestos a reiniciar el ciclo.

Otra manera de explicarlo es ésta:

1. Los espermatozoides y los óvulos contienen cada uno una baraja completa de cartas bien mezcladas. Esas cartas son iguales aunque su orden en la baraja es totalmente distinto en ambos casos, lo cual equivale al orden de las bases del ADN.

2. El espermatozoide y el óvulo se unen para formar el cigoto, que tendrá dos barajas completas distintas.

3. Repetidas divisiones celulares originan miles de millones de células corporales, que cada una contiene ambas barajas.

4. En las células sexuales del adulto:

a) las barajas se mezclan para formar una doble baraja completa;

b) esta baraja grande es cortada en dos y cuando las células sexuales se dividen, cada una de éstas se coloca en una célula hija.

## OTRAS MANERAS DE MEZCLAR EL ADN

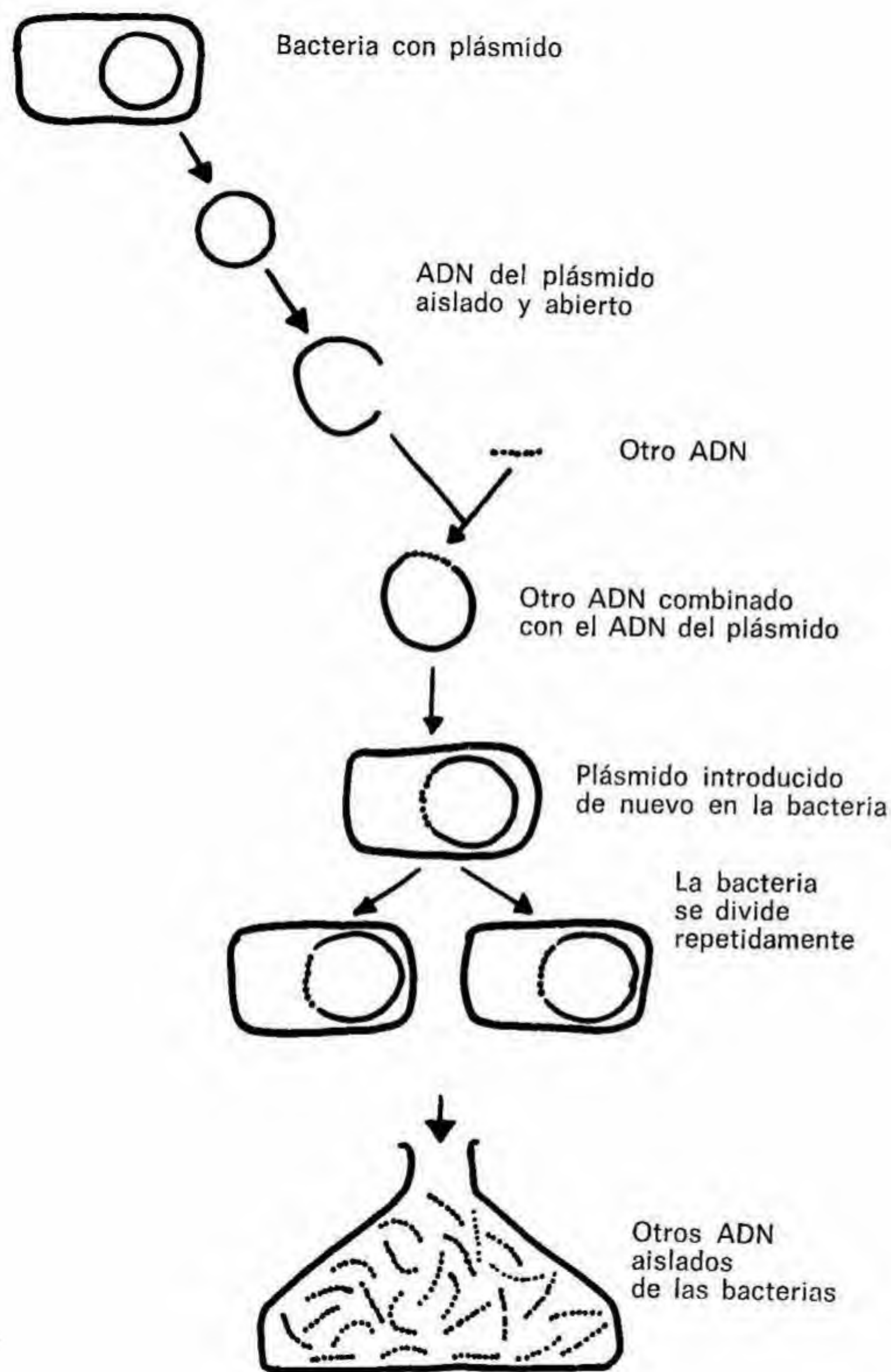
Parece apropiado que en una sección acerca de los métodos de mezcla del ADN se diga alguna cosa sobre las técnicas que los científicos han descubierto para combinar el ADN. Se concede mucha atención a la investigación del ADN recombinante, el arte de recombinar los ADN de distintos organismos para obtener grandes cantidades de genes para su estudio.

He aquí lo que ello implica. Las bacterias contienen, además de su fragmento mayor de ADN (su «cromosoma»), otra molécula pequeña de ADN, denominada plásmido. El ADN del plásmido tiene una configuración preferentemente circular, y puede salir y entrar fácilmente de la bacteria. Ambas propiedades de los plásmidos se utilizan en la investigación del ADN recombinante.

Cuando se expone el ADN del plásmido a determinados enzimas, el círculo se abre. (En la figura de la página 78 se ha exagerado el tamaño del plásmido.) Si entonces otro fragmento de ADN lineal corriente, cualquiera que sea su origen, se mezcla con el ADN abierto del plásmido, ambos ADN se juntan y se forma, de hecho, un gran anillo que contiene el ADN del plásmido y el del otro. Si el otro fragmento de ADN, por ejemplo, procede de células humanas, es posible conseguir un plásmido bacteriano que contenga un fragmento de ADN humano. ADN recombinante quiere decir esto. El plásmido híbrido producido de esta manera puede volver a entrar en las células bacterianas y en la medida en que las células bacterianas continúen dividiéndose y aumentando su número, también lo hará el plásmido con sus genes «exteriores».

El objetivo de los científicos que utilizan dicha técnica es,





en esencial, similar al de un procedimiento químico de análisis: obtener grandes cantidades de determinados genes para poder estudiarlos. Muchos biólogos consideran dicho método como uno de los más valiosos instrumentos descubiertos por la investigación biológica. Puede desempeñar, sin duda, un papel clave en el desciframiento del control genético de la embriogénesis y del control genético aberrante del cáncer, y también, en potencia, constituye una posibilidad de obtener grandes cantidades de productos genéticos proteínicos requeridos por la medicina, del tipo de la insulina. Más remota es la posibilidad de utilizar genes humanos reproducidos por las bacterias para una terapéutica de sustitución de genes en pacientes con deficiencias hereditarias de ciertos genes.

La evolución es la historia de una diversidad siempre creciente. Las constantes mutaciones del ADN y las continuas recombinaciones del ADN han creado numerosas diferencias entre los individuos. Puesto que se han ido acumulando las diferencias individuales, la mezcla sexual sólo puede darse entre organismos similares y las nuevas especies se ven así obligadas a evolucionar por separado, de tal suerte que la mezcla sexual del ADN ocurre únicamente entre los miembros de una misma especie. En este sentido, cada especie ha conservado el conjunto de genes que le son útiles, y ha evitado sobrecargarse con una creciente colección de genes extraños. Sin embargo, la diferencia entre los individuos de una misma especie y las diferencias entre especies parten de la misma base: los cambios del ADN.

Hay que reconocer, no obstante, lo cual ya es mucho, que el cambio por el cambio sin más, carece de sentido. El éxito o el fracaso de un organismo alterado sólo se puede medir con relación a cómo el ambiente «percibe» dicho cambio. El ambiente es el juez del significado del cambio biológico. En el siguiente capítulo se considerarán conjuntamente la mutación, el sexo y la selección ambiental.



## 6. Selección

Si una persona obesa y una persona delgada, de la misma edad e igual estado general de salud, naufragaran en el Atlántico Norte, la obesa tendría más probabilidades de volver a ver tierra firme. Existen dos razones para ello: por un lado, que la grasa es un magnífico aislante del frío, como lo atestiguan el cuerpo de las ballenas, focas y el de los propios obesos, y, por otro, que, al ser la grasa más ligera que el agua, le ayudaría a mantenerse a flote.

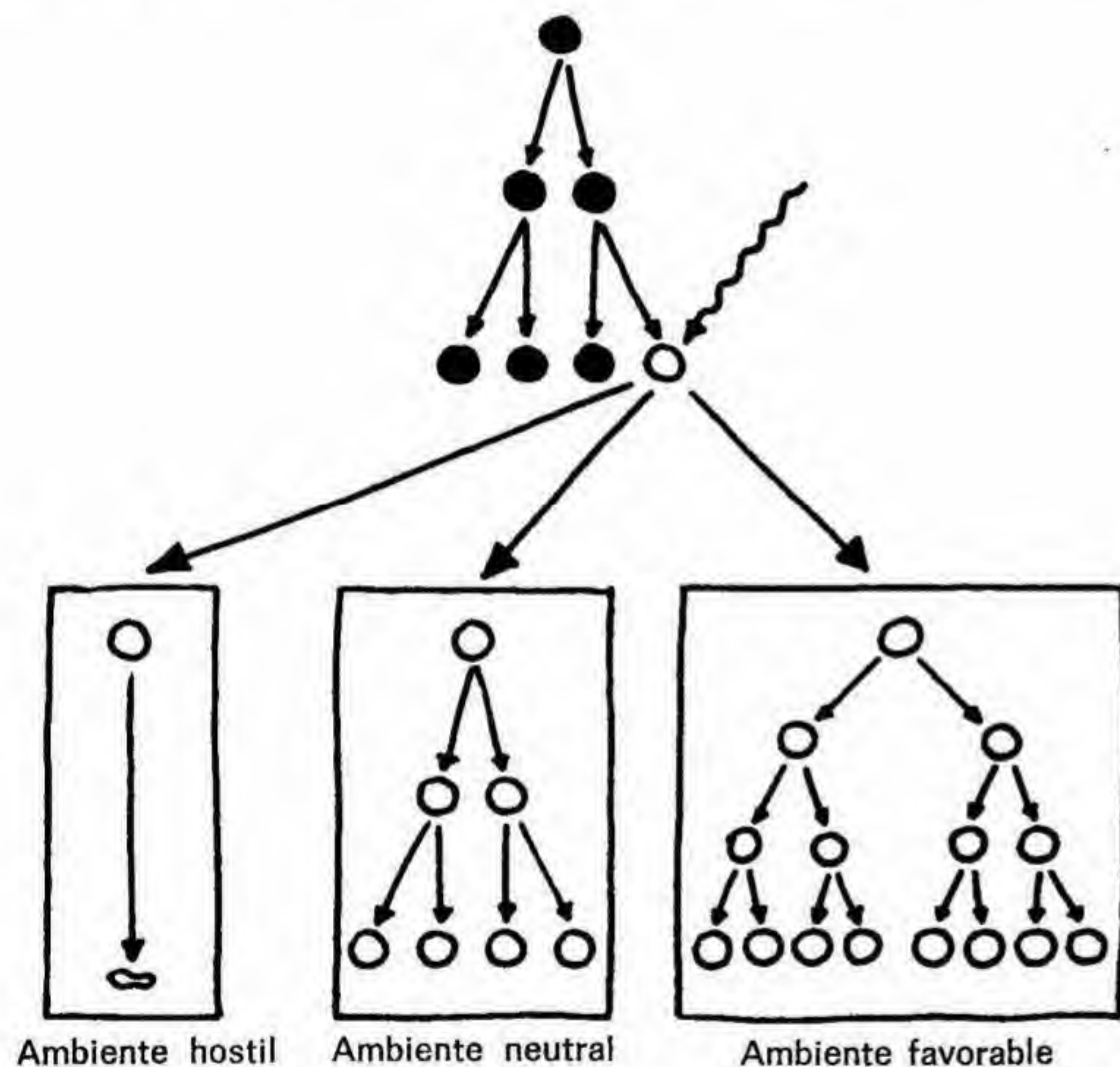
De eso se deduce que el valor, o la significancia, de los caracteres individuales de un organismo sólo se pueden medir en relación con el ambiente en que se encuentran. Aunque tener el cuerpo lleno de rodets de grasa sea, en la mayoría de las situaciones, una desventaja, cuando se naufraga en el Atlántico Norte, el mar se erige en juez del valor de la obesidad. El veredicto del Atlántico es que la obesidad tiene un valor de supervivencia: es bueno ser gordo.

### AMBIENTE Y CAMBIO

El ejemplo de los naufragos gordo y flaco sirve para ilustrar el pensamiento del autor, aunque al presentar de este modo las relaciones entre diferencia y ambiente no debe



apartar de considerarlas en términos de poblaciones y sus descendencias a lo largo de muchísimas generaciones. Si los progenitores viven en determinado ambiente y pasan un ADN cambiado a sus hijos, estos sus hijos, los hijos de ellos, y todas las generaciones sucesivas vivirán tan bien como sus progenitores, o mejor o peor que ellos. Esto se ilustra de forma más simple con algunas células en división.



En principio, resulta sencillo medir el éxito de un cambio habido en el ADN: se cuentan los individuos vivientes durante cierto número de generaciones después de haber ocurrido el cambio. Si la cifra total de individuos descendientes es superior al número total de individuos que vivían en el momento

del cambio, el cambio original del ADN fue beneficioso, mientras que si el número de organismos se ha reducido, el cambio ha sido perjudicial.

Semejantes consideraciones pueden aplicarse a una especie o población de organismos que se enfrente con un cambio ambiental: cabe que aumente o disminuya su capacidad para producir descendencia. Si disminuye, sólo se podrá evitar la eventual extinción, si ocurre otro cambio en el ADN, que produzca una variante capaz de reproducirse mejor en el nuevo ambiente.

En estas sencillas relaciones entre cambio y selección reside la clave de la evolución. Un ADN alterado significa cambios en las proteínas; modificaciones en las proteínas comportan organismos cambiados, que han de enfrentarse con un ambiente que no han elegido. Prosperarán aquellos organismos que presenten cambios que les supongan, a ellos y a sus descendientes, una ventaja, mientras que tenderán a morir los individuos que sufran cambios desfavorables. El ambiente natural selecciona, a favor de los organismos mejor dotados, en contra de los peor dotados.

El éxito o el fracaso de un episodio de la evolución nunca se mide en un individuo aislado o de forma inmediata, como sucedía, en cambio, con los naufragios —uno obeso; el otro, delgado— del Atlántico Norte. Se evalúa siempre en poblaciones grandes y en el transcurso de muchísimas generaciones.

La repercusión del ambiente sobre la capacidad de la especie de producir descendencia es, por consiguiente, el factor clave. La tasa de reproducción es el punto crucial.

## AZAR

El azar es la melodía de la evolución. De qué manera una mutación altera el ADN es una cuestión fortuita. Qué caracte-



rísticas de un par de progenitores aparecerán en sus descendientes como consecuencia de la mezcla sexual de sus ADN es una cuestión aleatoria. El encuentro de los individuos que se aparean es cuestión de azar, del mismo modo que queda en manos del azar qué ambiente seleccionará los organismos cambiados. Por tanto, las raíces de la vida están profundamente enterradas en el azar.

## VOLVIENDO A LAS BOTELLAS

Volvamos a las botellas encontradas en la playa, del capítulo 1. Supóngase que aquellas botellas son organismos. El suceso fortuito que cambia la botella, una «mutación» de botella, sería, si se quiere, la reposición fortuita del tapón. El ambiente sería, en este caso, el mar, al que fueron arrojadas numerosas botellas, tapadas y destapadas. El mar efectuaría la selección: las botellas destapadas se hundirían en el fondo, mientras que las botellas tapadas flotarían en la superficie hasta alcanzar la orilla como supervivientes.

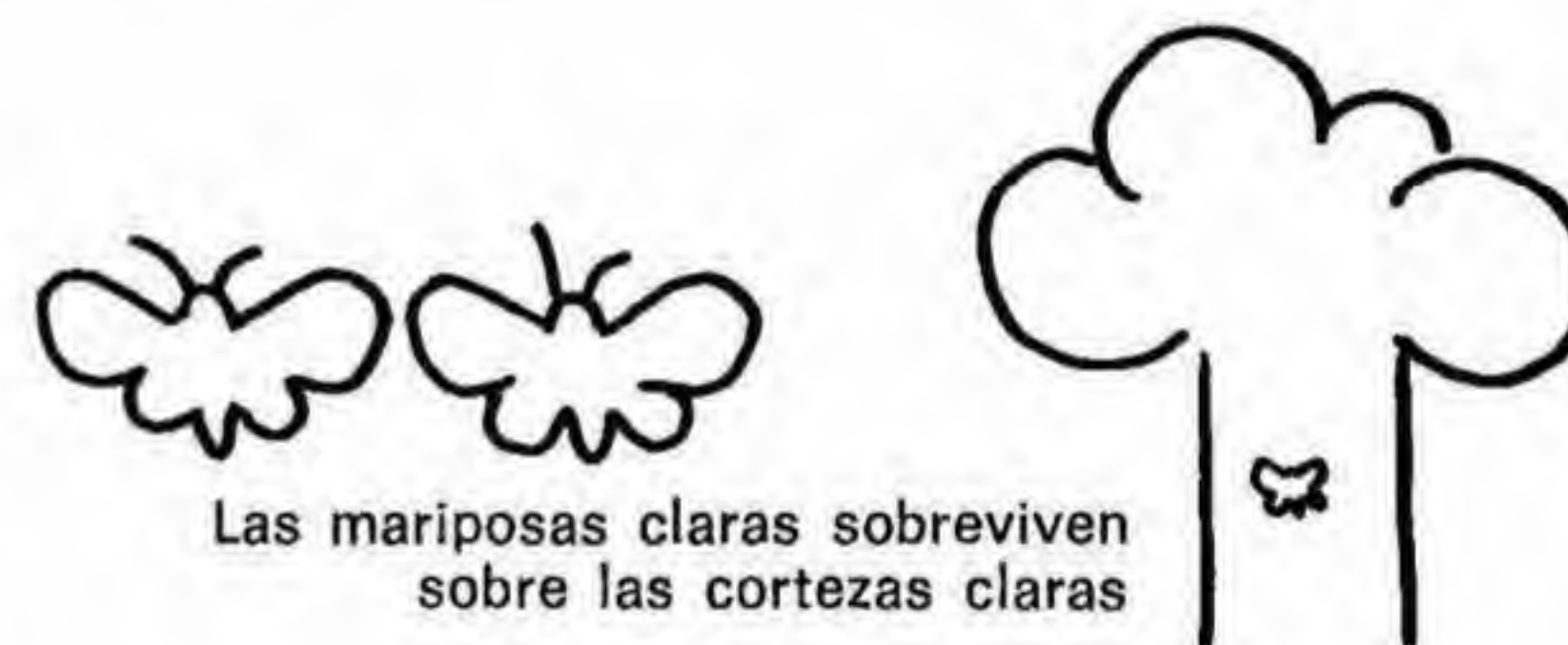
Se comprende fácilmente que el modelo de las botellas «cambiadas» y la selección no es apropiado, porque las botellas no pueden reproducir su especie; cabría mejorar el ejemplo admitiendo que unas pocas botellas son sexualmente activas y tapadas, arrojadas al mar junto con muchísimas botellas destapadas, hacen su camino hacia la orilla al tiempo que poseen capacidad para reproducirse; se aparearían, producirían hijos y nietos hasta alcanzar a formar una floreciente comunidad de botellas tapadas en la playa.

Habiendo dotado de sexualidad a las botellas, nada impide llevar un poco más allá su evolución. Supóngase ahora que, durante un cierto tiempo, la playa se vuelve rocosa, de modo que en cada pleamar las botellas serían zarandeadas contra las rocas. Todas las botellas de vidrio relativamente

delgado no resistirían tan bien como las de vidrio más recio. De modo que la población de vidrio delgado, que había resistido igual que la de vidrio recio el viaje oceánico, estaría actualmente en desventaja. Algunas serán capaces de reproducir algunos descendientes pero muchas, no. Además, la descendencia también tendría mayor riesgo ante las rocas y sucumbiría asimismo. Al cabo de poquísimas generaciones casi todas las botellas de la playa serían de vidrio recio.

## MARIPOSAS

Hace algunos años, ciertas polillas o mariposas nocturnas prosperaban en los alrededores de Birmingham (Inglaterra).



Medraban en los troncos de los abedules, sobre cuya corteza eran casi invisibles, en especial para las aves que se alimentan de ellas.

Con el paso del tiempo, creció en gran manera la industria en Birmingham, y el hollín suspendido en la atmósfera fue oscureciendo los árboles y haciendo patentes, en consecuencia, a las mariposas. Sobre las ahora oscuras cortezas, resultaban muy visibles para las aves. En vista de ello, la población de polillas, con el transcurso de las generaciones, disminuyó hasta casi la extinción.

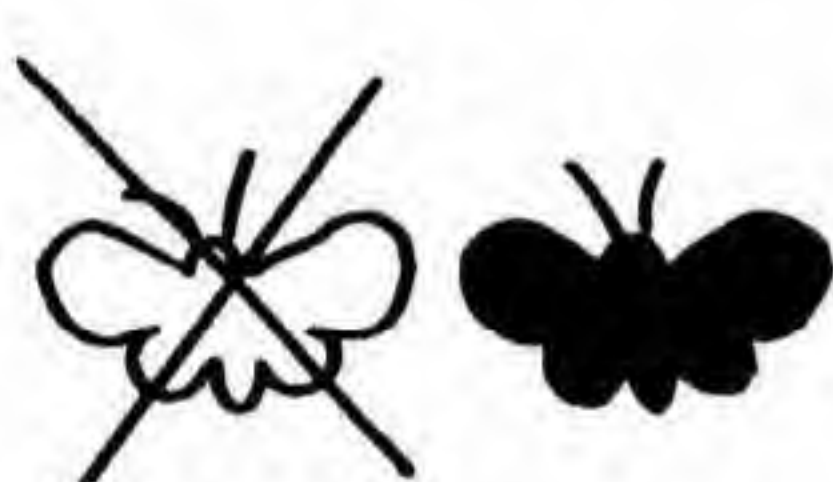




Los árboles ennegrecidos  
permiten a los pájaros  
distinguir mejor  
las mariposas claras



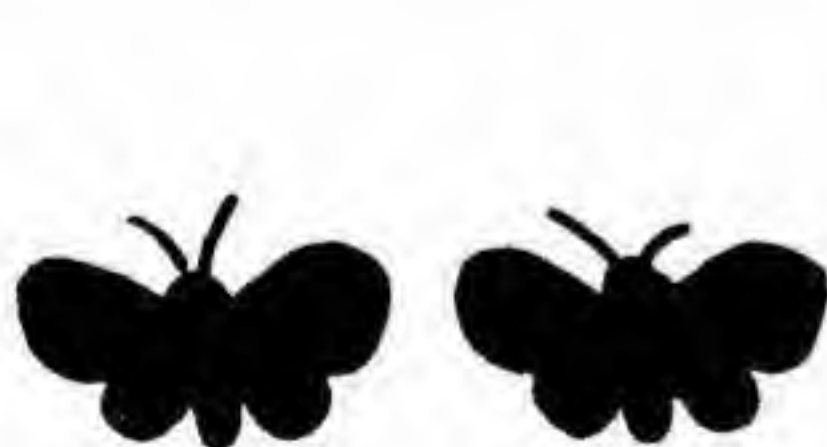
Durante este período se observó una ocasional polilla oscura, variedad que pasaba inadvertida sobre la oscura corteza de los árboles.



Las mariposas oscuras sobreviven  
sobre las cortezas oscuras



Su número creció rápidamente y, al fin, estas nuevas polillas llegaron a ser abundantes en la región.



Las mariposas oscuras sustituyen  
a las mariposas claras



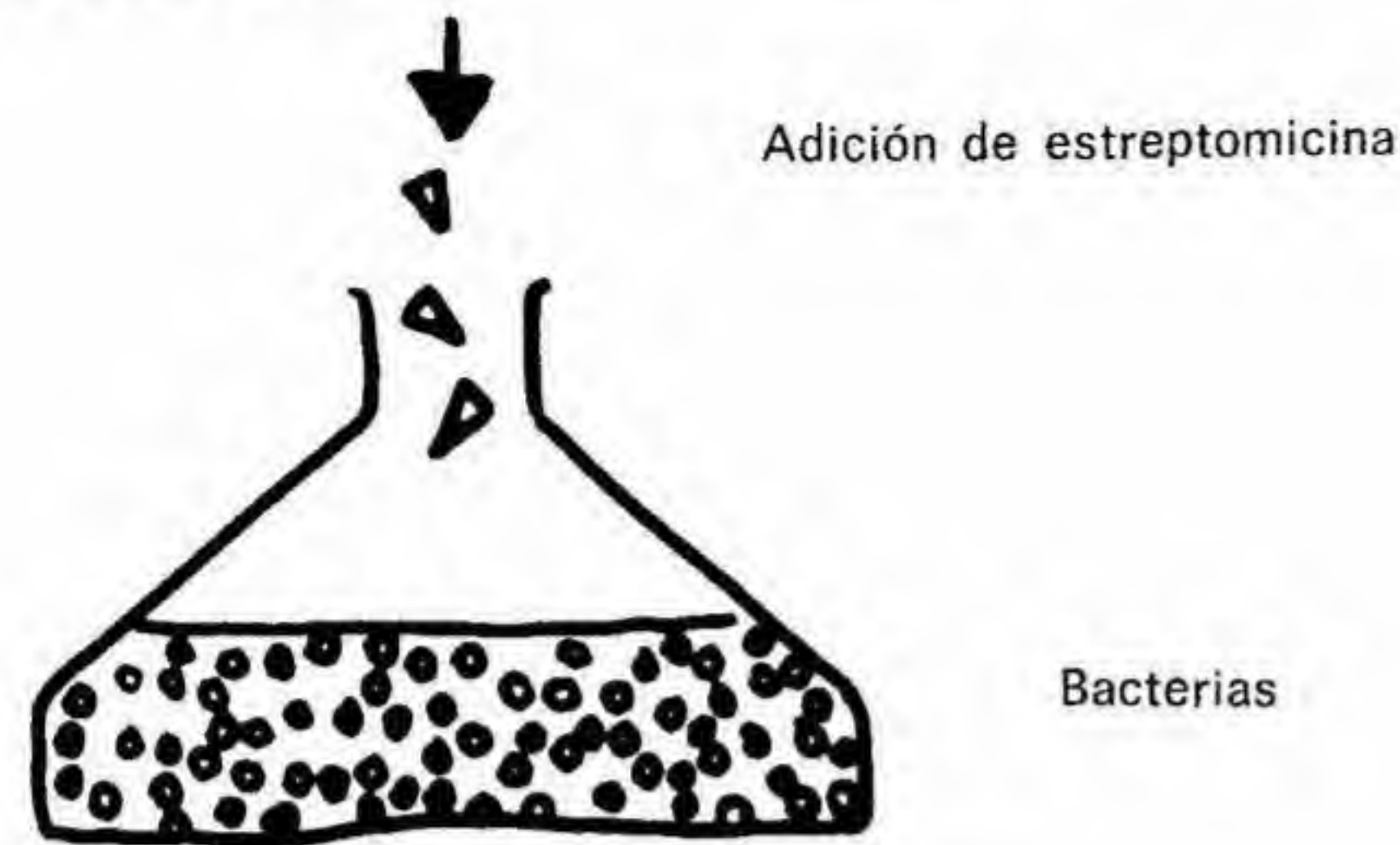
Esta verídica historia pone de manifiesto la relación existente entre los organismos y el ambiente. Las cortezas oscuras y los pájaros predadores constituyen un ambiente que ha actuado en contra las polillas claras causando la disminución de sus poblaciones. Una mutación fortuita ocurrida en este lapso de tiempo produjo una polilla oscura. Al principio, cuando los árboles eran claros, esta mutación debió ser desfavorable, pero ahora resultaba beneficiosa para dichas polillas oscuras, que podían aparearse y tener descendencia, de modo que tanto ellas como sus descendientes prosperaron. El efecto conjunto de un ambiente cambiante y unas mutaciones fortuitas produjeron el cambio completo del carácter de una población.

## LAS BACTERIAS TAMBIÉN

Las bacterias son excelentes modelos experimentales para estudiar los cambios que jalonan la evolución, es decir, de la selección natural. Constituyen líneas puras, o sea, todos los individuos de una población son idénticos porque proceden de una célula única y, por otro lado, cada quince minutos se origina una nueva generación, de modo que es posible observar poblaciones durante muchas generaciones en un tiempo razonable.

Se coloca una población pura de bacterias en un matraz, en unas condiciones de laboratorio semejantes a las que Birmingham preparó a sus polillas, o sea, creándoles un ambiente desfavorable. Para ello se añade una gota del antibiótico estreptomycin al caldo de cultivo.

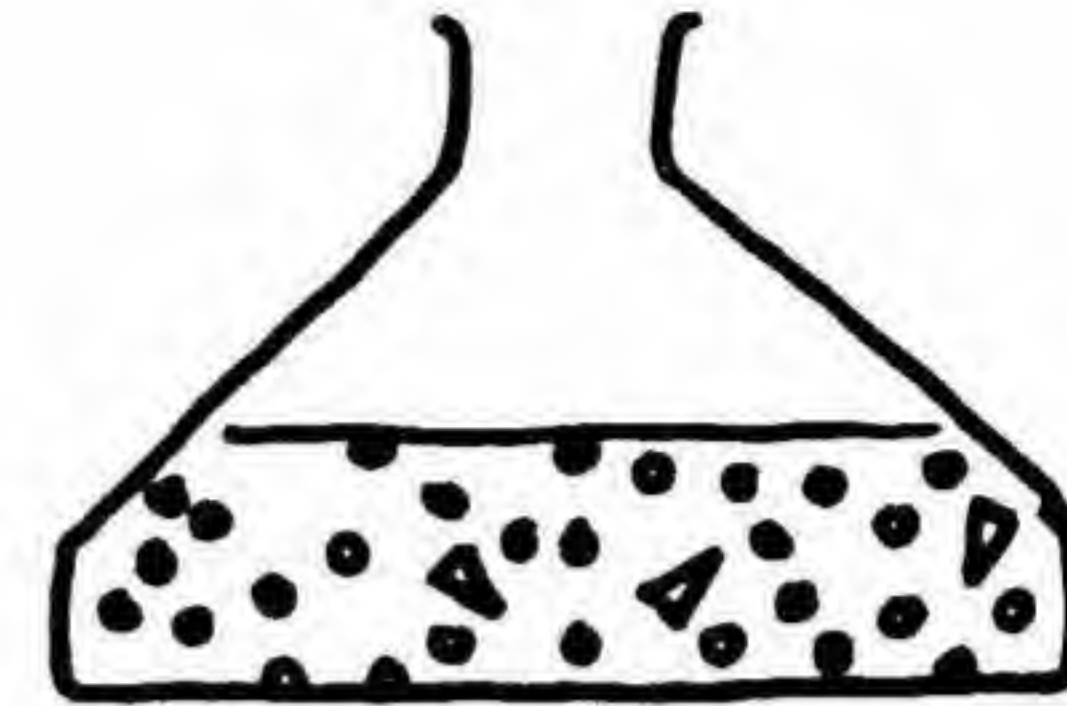




Ello supone una catástrofe para las bacterias, ya que dicho medicamento las mata. El crecimiento se detiene en seguida y las células comienzan a morir. Al cabo de pocas horas parece que todas las células han muerto.



Cabría realizar determinada prueba para averiguar si alguna célula continúa viva y en tal caso se encontrarían unas pocas células con vida —cerca de diez, por ejemplo— entre los millones de células muertas. Se podría demostrar, además, que cada una de dichas raras células vivas es capaz de multiplicarse bastante bien en presencia de la estreptomicina.



El medicamento ya no causa daño alguno y este carácter de resistente a la estreptomicina se hereda: todas las generaciones descendientes de aquellos pocos supervivientes heredan la resistencia al fármaco.

¿A qué se debe este fenómeno? En estas poblaciones tan grandes de bacterias (muchos millones de células) existe una considerable posibilidad —quizá de una entre diez millones— de que las células sufran una mutación que las haga resistentes a la estreptomicina. Lógicamente, tal mutación ocurrirá tanto si la estreptomicina está presente como si no la hay. Si no hubiera estreptomicina, no se sabría que ha ocurrido dicha mutación. Pero en presencia de estreptomicina, prevalecen los organismos resistentes porque tienen una ventaja selectiva y, por tanto, dichas células resistentes a la estreptomicina pueden dividirse hasta llegar a ser dominantes en la población; en cambio, las bacterias originales mueren porque no están preparadas para sobrevivir en aquel ambiente particular. Esta historia es, en esencia, idéntica a la de las polillas.

## RETORNO A LA SOPA

En el capítulo 2 se hacía referencia a la descendencia de la primera célula terrestre devorando ávidamente la rica sopa donde tuvo lugar su génesis. Ahora cabe perfeccionar aquel



cuadro considerando que la capacidad de comer de un organismo —esto es, de ingerir y generar energía a partir de compuestos como los hidratos de carbono— depende de enzimas especiales. Pero no se pueden consumir estos hidratos de carbono si las células carecen de estas enzimas. Se daría una situación semejante si en los intestinos del hombre no hubiera los enzimas digestivos esenciales: aunque dispusiera de determinados alimentos no sería capaz de introducirlos en su cuerpo y quemarlos. Aunque la primera célula terrestre poseyera la capacidad de utilizar uno o más productos químicos del tipo de los hidratos de carbono constitutivos de la sopa, es razonable suponer que no tendría la capacidad de utilizar todos los tipos presentes en ella, y así después de haber consumido todos los materiales que podía usar pararía de dividirse y permanecería en un estado de «actividad en suspenso». En la actualidad, las bacterias, cuando agotan los productos que necesitan para alimentarse, hacen precisamente esto: se paran y esperan. Con miles de millones de células esperando en la sopa, las mutaciones fortuitas pudieron producirse durante largos períodos de tiempo. Si alguna de tales mutaciones originaba un organismo capaz de pasar a utilizar otro producto, dicho organismo estaría en condiciones de multiplicarse de nuevo. En este sentido, una creciente variedad de organismos podría haber consumido la sopa viviendo en ella.

## LA EVOLUCIÓN EN LA NATURALEZA

Los ejemplos considerados hasta aquí pueden catalogarse de evolución domesticada. Hay una clara relación entre un simple cambio en una población y la selección a favor o en contra de dicho cambio. Las criaturas que se utilizan en el laboratorio son, esencialmente, cepas puras, al menos hasta la introducción de una mutación.

En el mundo natural, aunque son aplicables los mismos principios, la situación es más complicada. Raramente se encuentran líneas puras en la naturaleza. De hecho, lo que ya sorprendió a Darwin, y lo que debería sorprender a toda persona cuando contempla la naturaleza, es la gran variedad de formas vivientes. Pero no sólo la variedad de los distintos tipos, especies o criaturas sino también la variedad dentro de las especies. Casi todos los caracteres que son susceptibles de medirse en una especie muestran gran variación. Incluso en la especie humana ocurre esto: aunque todos los hombres son humanos, varían muchísimo de unos a otros; y en otros animales sucede lo mismo: el espesor del pelo, la velocidad de la carrera o el salto, la forma y el tamaño de la dentadura, la altura y el peso, la fuerza, el sentido de la vista y el del olfato, la atracción por el sexo opuesto, todo varía dentro de un amplio margen.

Si se midiera uno de estos caracteres en una cepa pura de ratones de laboratorio, no se encontraría diferencia, todos los animales resultarían idénticos.

La variedad permite trabajar a la evolución. Aunque Darwin y Wallace desconocían la causa de la variación —la mutación y la mezcla sexual del ADN— valoraron su importancia y desarrollaron, a partir de ella, su teoría.

Ahora es posible fundamentar la idea de que determinada población en un momento dado de la historia de su desarrollo lleva en su ADN gran número de cambios acumulados.

La población es el receptáculo de todos los cambios pasados y de todas las selecciones efectuadas por el ambiente, lo cual explica la gran variedad de los individuos dentro de una población y sobre esta variación actúa la selección en el posterior desarrollo de aquélla.

Considérese, por ejemplo, únicamente una variable: la capacidad para la carrera. Entre los grandes rebaños que pastan en una pradera habrá gran variedad de velocidades extre-



mas. Con gran número de leones acechando desde los márgenes, los corredores más veloces tendrán mayor probabilidad de sobrevivir y de reproducir su clase, de modo que, a lo largo de muchas generaciones, y suponiendo el ambiente estable, el rebaño se habrá enriquecido relativamente en animales más veloces, con lo cual aumentará, además, la velocidad media del rebaño.

Cabe, asimismo, examinar las fuerzas subyacentes a la aparición de otros caracteres:

<i>Cambio ambiental</i>	<i>La selección favorece</i>
De selva a pradera abierta	patas aptas para correr.
De pradera a pradera con predadores:	patas más aptas para correr.
De suelo de la selva a copa de los árboles:	extremidades más ágiles para colgarse de las ramas.
De tierra al aire:	huesos más ligeros; extremidades más largas y plumas.
Del calor al frío;	pelaje más robusto
De comer carne a comer hierba:	dientes más cortos y planos.

## ¿TIENE UN PROPÓSITO LA EVOLUCIÓN?

Uno de los problemas que se presenta al intentar comprender la evolución proviene de que parece que los cambios observados obedecen a un propósito o son intencionados cuando, en realidad, los únicos mecanismos desencadenantes son los acontecimientos fortuitos. Por ejemplo, si los animales de un medio, donde además abundan otros animales más pequeños, desarrollan gradualmente dientes para comer carne,

el cambio tiene un sentido: sus descendientes podrán devorar a los otros animales, porque se lo permitirá su dentición carnívora. Esto parece tener un propósito, como si el medio dirigiera a los animales a aprovecharse del cambio. En realidad, esta manera equivocada de pensar llevó a T. D. Lysenko, Stalin, Kruschov y a toda la Unión Soviética a interpretar un sainete científico que duró casi treinta años. Puesto que no se concibe cómo un ambiente puede incitar al cambio a determinada población animal es razonable no esperar que así ocurra. Más bien hay que pensar que una población posee gran variedad de formas y tamaños de dientes en virtud de la acumulación de cambios fortuitos. A cada vuelta de la rueda generacional, los animales con más adecuada estructura dental para matar animales y devorar su carne tendrán mayor oportunidad de sobrevivir y de dejar descendencia. De forma gradual, con el transcurso de la selección durante muchas y muchas generaciones, aparecerá una especie animal carnívora. Este proceso carece por completo de propósito.

La palabra «selección» resulta quizá engañosa ya que connota precisamente propósito. El ambiente es totalmente pasivo, pues no causa la aparición de los cambios favorables o desfavorables. Los cambios ocurren de forma espontánea (mutación y mezcla sexual), y una vez producidos pueden contribuir a que el animal utilice mejor su ambiente.

Volviendo, por un momento, a las polillas, entre una gran población de polillas blancas la aparición ocasional de una polilla oscura fue un suceso puramente fortuito, no relacionado con «necesidad» alguna. Dicho acontecimiento pudo ocurrir con la misma probabilidad durante el período de árboles blancos que en el subsiguiente período de árboles oscuros. Los árboles no dirigieron la aparición de la mutación oscura. Pero, si por azar, la polilla variante apareció durante el período de árboles oscuros, tuvo muchas más probabilidades de sobrevivir y de producir descendencia oscura.



## LA MUTACIÓN Y LA SELECCIÓN EN EL HOMBRE

El hombre ha evolucionado, a partir de formas más sencillas, por mutación y selección sexual, del mismo modo que las bacterias y las polillas. Todavía ahora se pueden observar algunos aspectos de dicho proceso. Diversas mutaciones le producen variaciones en forma de enfermedad, causadas por la alteración de alguna proteína que desempeña alguna importante función corporal. La incapacidad de la proteína para cumplir correctamente su función origina la enfermedad. Existe gran número de enfermedades genéticas específicas que tienen esta causa; en cada una de ellas, una proteína distinta, por lo general un enzima, no funciona adecuadamente. Un ejemplo, del que ya se ha hablado (véase el capítulo 5), es la anemia falciforme. En este caso, un cambio o mutación del ADN conduce a la formación de una molécula de hemoglobina anormal. La molécula de hemoglobina anormal altera, a su vez, la configuración de los glóbulos rojos sanguíneos en que es transportada, y les confiere forma de hoz.

Ciertamente, no se pueden decir muchas cosas a favor de esta enfermedad, pero las personas aquejadas de anemia falciforme y residentes en aquellas regiones de África donde la malaria es endémica, están protegidas de la malaria por dicha anemia. Causa la malaria un parásito que se introduce y vive en el interior del glóbulo rojo y lo daña. Pero este parásito no ataca los glóbulos rojos falciformes sino que prefiere los glóbulos rojos de víctimas más sanas.

Las relaciones entre la anemia falciforme y la malaria ponen de manifiesto la sutileza de las existentes entre un organismo alterado el hombre— y su ambiente. Aunque aquellos que sufren la anemia están en desventaja respecto a la evolución (porque padecen la enfermedad), en el territorio de la malaria pueden presentar una ventaja relativa frente a quienes enfermarán aún más por culpa de la malaria.

## VARIEDAD DE ESPECIES

Donde quiera que se mire se encuentra algún tipo de vida aplicada con diligencia a la función de sobrevivir. Ya sea en algo de tierra o en una gota de agua, en las alturas o en las profundidades, en las cálidas primaveras o en la tundra helada, en el océano o en el aire, en el árido desierto o entre los vapores de la selva, la evolución parece haber encontrado un lugar para cualquier imaginable forma de vida, e incluso para las no imaginables. Utiliza cualquier modo de sentir, moverse, comunicarse, amar, luchar, protegerse y reproducirse. Y, además, todo lo que actualmente se ve en la Tierra es sólo una minúscula parte de las variedades de criaturas vivientes que han vivido y han desaparecido. Los dinosaurios son «monumentos» a los innumerables ciclos de aparición-éxito-fracaso-extinción que se han sucedido durante miles de millones de años.

¿Pueden el cambio y la selección explicar toda esta diversidad y complejidad? Dado el estado actual de nuestros conocimientos acerca de los detalles de cómo pudo suceder todo esto, únicamente cabe afirmar que, en principio, la interacción entre cambio y selección puede explicar la observada, y creciente, complejidad. Constituye una explicación suficiente. Los cambios que otorgan a los organismos capacidades añadidas incrementan sus probabilidades de supervivencia. Con tiempo suficiente todo se puede probar.

Pero el hombre puede estar seguro de una cosa. Si hubiera vivido hace dos o tres mil millones de años y hubiese intentado mirar hacia el futuro no habría logrado predecir lo que acontece actualmente. Nadie hubiera podido adivinar al hombre o a cualquier otra criatura viviente. ¿Por qué? Porque cada paso de la evolución es un acontecimiento fortuito, y, por tanto, impredecible. Todas las criaturas vivientes, incluido el hombre, son el producto de una enorme y larga serie de



acontecimientos casuales ¡Puede decirse que increíblemente improbables! He ahí otra manera de expresarlo si la evolución empezara de nuevo en la misma Tierra y en idénticas condiciones, la probabilidad de volver a producir el hombre sería infinitamente pequeña. También cabe añadir, incidentalmente, que –basándose en el mismo razonamiento– es muy pequeña la probabilidad de que existan en algún lugar del universo criaturas parecidas a nosotros. La probabilidad de vida es grande, pero la probabilidad de vida próxima al hombre es muy pequeña.

En conclusión, el cambio y la selección son suficientes para explicar la presencia humana. Y la ciencia siempre gusta de explicaciones suficientes, es decir, sencillas.

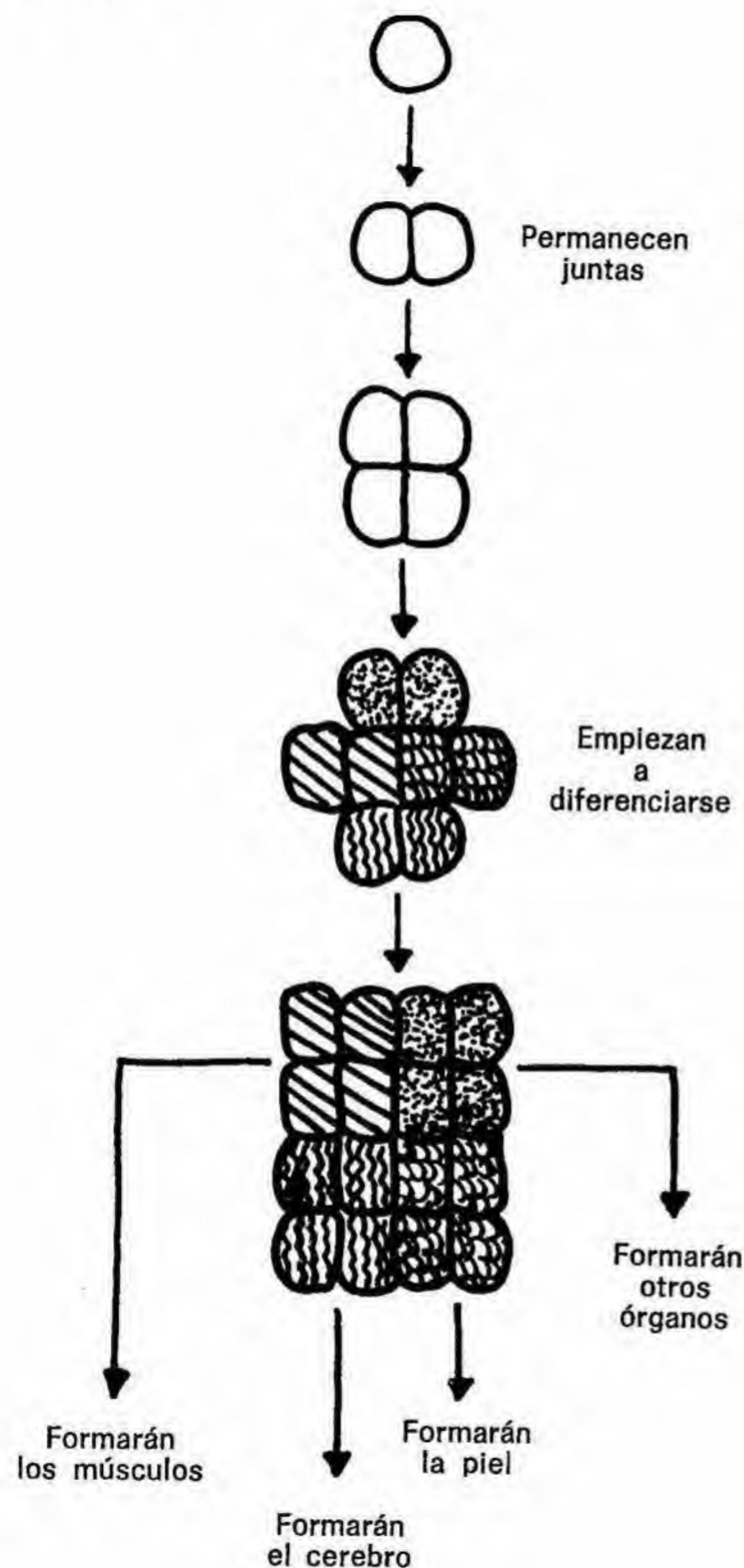
## 7. Embriogénesis

La embriogénesis, o sea la formación del embrión, es el más apasionante y fascinador de todos los problemas de la biología. La embriogénesis es el conjunto de procesos que conducen desde una célula única, el cigoto, hasta el organismo complejo y formado por muchas células que está destinado a ser. Este destino está escrito en el ADN, que proporciona todas las instrucciones para esta serie de acontecimientos del desarrollo, exquisitamente orquestada. Debemos reconocer que ignoramos muchos extremos de este maravilloso proceso, pero podemos, por lo menos, explorar sus aspectos generales.

### LAS CÉLULAS SE JUNTAN Y SE ESPECIALIZAN

Un cigoto, al igual que otras criaturas unicelulares más simples, comienza su vida dividiéndose en dos células, que, a su vez, se dividen para originar cuatro y así sucesivamente. De la observación de las criaturas unicelulares cabría esperar que las células se separaran después de cada división. Sin embargo, los descendientes de un cigoto no se separan: se juntan, como si supieran que participan en una empresa común.





Pronto se pone de manifiesto otra característica: las células se diferencian en grupos, de aspecto y comportamiento distintos. Los grupos de células se especializan, y cada grupo realiza un número limitado de funciones específicas. El proceso de especialización es irreversible, no se puede volver atrás.

Las dos características de la embriogénesis temprana –la agregación celular y la especialización celular– están íntimamente ligadas al proceso del desarrollo.

## EL ORIGEN DE LA DIFERENCIA

Hasta aquí se han considerado las leyes aplicables a todas las criaturas vivientes, reglas que determinan cómo éstas se hacen gradualmente distintas durante largos períodos de tiempo. Todas las criaturas vivientes tienen almacenada su información en el ADN, transcriben el ADN en ARN mensajero y traducen el ARN mensajero en proteína y, además, la variación de su ADN por mutación o mezcla sexual produce la alteración permanente de las proteínas, lo cual introduce y acumula paulatinamente diferencias entre los organismos originando, finalmente, nuevas especies.

La embriogénesis se parece, en algunos sentidos, a una evolución en un microcosmos durante un corto lapso de tiempo. Así, por ejemplo, se advierte cómo un embrión animal pasa por varios estadios de desarrollo y semeja un pez antes de parecer la criatura adulta que está destinada a ser. El parecido con el pez no es algo superficial; el embrión temprano dispone de branquias auténticas para la respiración acuática. Como quiera que el embrión no necesita las branquias –toma el oxígeno y el alimento de la madre a través del cordón umbilical– no parece demasiado fácil la explicación de por qué el embrión repite, aparentemente, un estadio del desarrollo de su evolución.



Pero, es lícito preguntarse, ¿qué produce la diferencia durante la embriogénesis? ¿Cómo las células toman la decisión de convertirse en células de la piel, en células musculares, en células nerviosas, etcétera? La naturaleza da la llamada por respuesta. Permite obtener cuantiosos datos acerca de los mecanismos universales del tratamiento de la información por la célula, pero cuando se trata de a qué se debe que las células sean distintas unas de otras, nuestra ignorancia es total. Algunos científicos creen que se necesitan conceptos y métodos completamente nuevos para ahondar en las profundidades de la embriogénesis. Nosotros pensamos que no nos hacen falta, que es probable que las causas de que las células se diferencien sean más complicadas que lo descubierto hasta ahora.

## INTERÉS MÉDICO DE LA EMBRIOGÉNESIS

Tiene gran importancia para la medicina conocer la embriogénesis, no sólo porque la transformación de una sola célula en un individuo entero estimule en gran manera el afán investigador de los científicos sino también por su relación con las investigaciones respecto al mejor control de los problemas relativos al embarazo, al control de la natalidad, a la mortalidad infantil, a las enfermedades congénitas y hereditarias y al cáncer. Los científicos tienen el presentimiento de que el conocimiento de la embriogénesis aclararía muchísimo de estos oscuros problemas de la medicina.

## MÁS SOBRE LA AGREGACIÓN

Cuando el cigoto empieza a dividirse, las células se agregan. ¿Qué las hace agregarse? Una especie de pegamento,

aunque, en realidad, no lo es. Más parece como si la superficie de las células presentase relieves, como dientes pequeños que engranaran con los de otras células. De hecho, el ADN celular da instrucciones a la maquinaria de elaborar proteínas para que forme proteínas específicas que migran al exterior de la célula, donde actúan como los dientes de un engranaje. En la medida en que las células se especializan para constituir las distintas partes del cuerpo, sus dientecillos de proteína de la superficie también se especializan. Las células de un tipo particular se reconocen así mutuamente.

## ENERGÍA PARA LA EMBRIOGÉNESIS

Ha quedado ya de sobra patente que se necesita energía para cualquier proceso constructivo. Hay que proporcionar hidratos de carbono al embrión en desarrollo para que sus células puedan quemarlo y producir ATP. La yema del huevo donde se desarrolla el embrión de los peces, reptiles, aves y otras criaturas le facilita el alimento. Los animales que se desarrollan en el útero materno lo reciben por otro sistema. Junto con el embrión se desarrolla rápidamente la placenta entre él y la pared interna del útero materno. La sangre materna y la del embrión en formación se mezclan en la placenta y así el alimento ingerido por la madre pasa al embrión. De este modo el embrión obtiene la energía necesaria para ir constituyéndose.

## SE DISTRIBUYE LA MISMA INFORMACIÓN A TODAS LAS CÉLULAS

El cigoto empieza con la dotación completa de ADN, recibida del padre y de la madre, y, a medida que se divide, cada generación sucesiva de células recibe la misma cantidad total



hasta alcanzar el estado adulto. Así, una persona humana compuesta por sesenta billones de células contiene sesenta billones de copias idénticas de ADN, y todas las células del cuerpo poseen exactamente la misma información (excepto las células reproductoras, que tienen la mitad de ADN de que disponen las demás células).

## CONTROL DE LA EXPRESIÓN DE LOS GENES

No es aventurado suponer que el secreto de la embriogénesis, cuando se conozca, residirá en la manera en que las células controlan la expresión de los genes del ADN. Toda la información está ahí, en espera de crear un adulto. Si se pudiera examinar el interior de cada célula del embrión en desarrollo se observaría, por ejemplo, que los enzimas empezarían a copiar algunos de los genes del ADN del cigoto en ARN mensajeros, que dichos mensajeros se dirigirían a los ribosomas y empezaría la síntesis de las proteínas específicas. El cigoto podría dividirse cuando contuviera todas las proteínas necesarias, incluso algunos ribosomas más, y después de que su ADN se hubiera duplicado. Cada una de las dos células resultantes tendría una nueva dotación completa de ADN, nuevos ribosomas y nuevas cantidades de todo lo demás. Sería, en realidad, una copia exacta de la célula de la que procediera. Se repetiría el proceso de síntesis de proteínas y de formación de nuevas células del cual resultarían cuatro células y continuaría de igual manera hasta alcanzar la fase de ocho células.

Hasta aquí, el proceso es, en esencia, el mismo que en las bacterias cuando se dividen. Cada generación es una repetición idéntica de la generación anterior: ADN-ARN mensajeros-proteínas-división celular. Pero aparece algo nuevo cuando se inicia la especialización celular. Si la descendencia de un grupo de células se encamina a convertirse en piel, otra en

músculo, una tercera en cerebro, etc., el ADN ha de proporcionar las directrices indispensables. Debe determinar no sólo cualquier diferencia entre las células sino también el momento de aparición de estas diferencias.

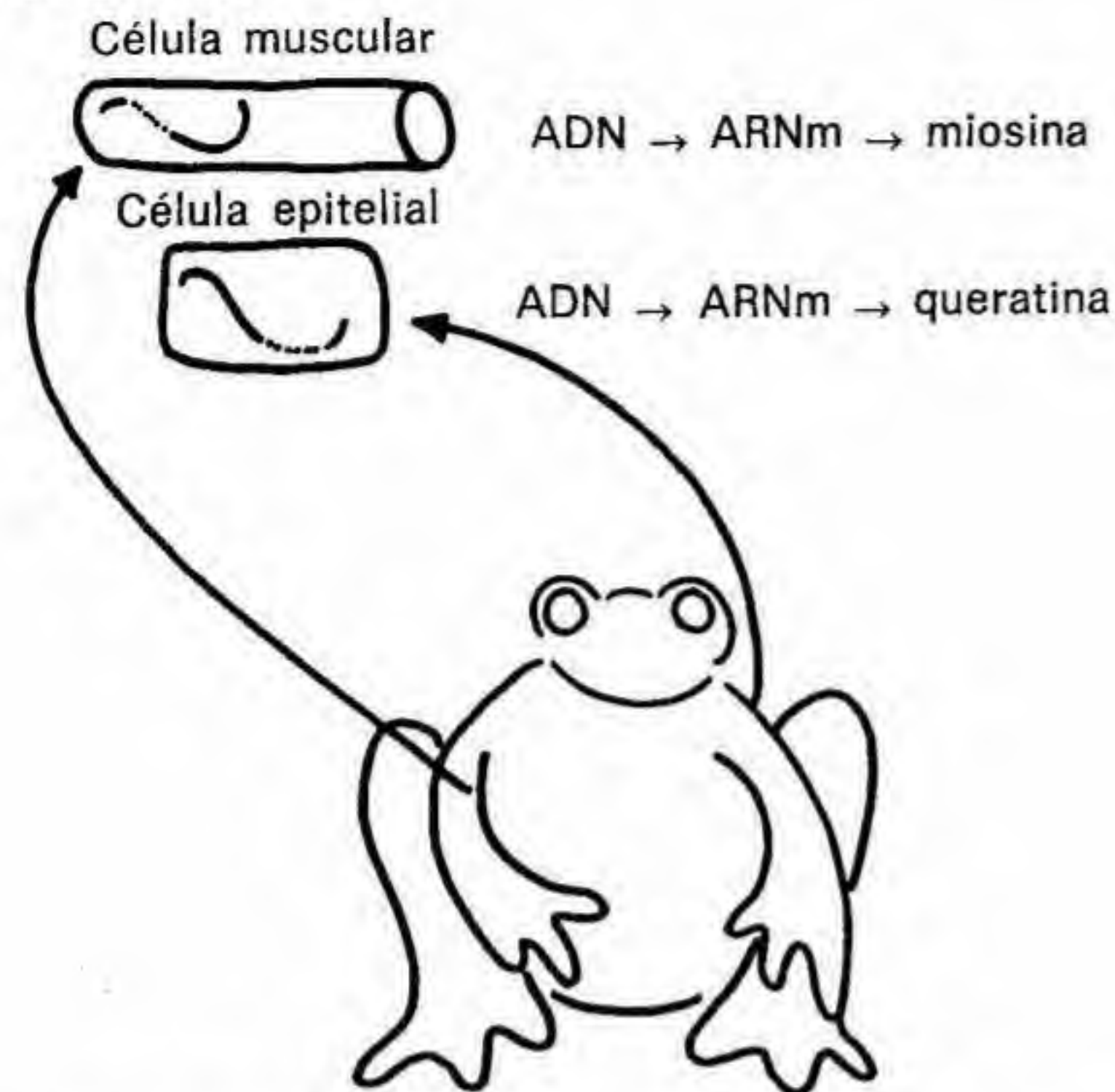
Si cada una de las células individuales de esta comunidad de células en desarrollo contiene exactamente la misma cantidad de ADN, ¿cómo es posible que lleguen a ser distintas dichas células?

El carácter de determinada célula, ya sea de la piel, del músculo o del cerebro, viene determinado por las proteínas que elabora. Las células de la piel, por ejemplo, son ricas en queratina, proteína que confiere a la piel su especial capacidad de protección. Las células musculares contienen mucha miosina, proteína que tiene la propiedad específica de reaccionar con una proteína complementaria y cambiar de este modo su longitud, lo cual permite la contracción de las fibras musculares. Las células cerebrales disponen de proteínas que intervienen en la transmisión de impulsos eléctricos. Del mismo modo, las células de los demás tejidos especializados producen sus propias proteínas exclusivas, que, a su vez, determinan el carácter de las células.

De este modo, algunas células comenzarán produciendo queratina para llevar a cabo su destino como células de la piel; otras empezarán a elaborar miosina y serán células musculares. Y, sin embargo, todo el ADN tiene un gen para la queratina y un gen para la miosina.

Los genes están ahí y parece, por tanto, como si el gen para la queratina deba manifestarse en las células de la piel mientras deba permanecer ignorado en ellas el gen para la miosina. Y, por otro lado, el gen para la miosina deba manifestarse en las células musculares y el gen para la queratina deba permanecer ignorado en ellas. Es decir, las células de la piel leen el gen para la queratina a fin de formar ARN mensajero, el cual alcanza el ribosoma y lo traducen en la proteí-





na queratina. La célula en donde ocurre este proceso se convierte en una célula epitelial.

El ADN debe poseer la capacidad de manifestar e ignorar, respectivamente, sus genes en una secuencia temporal programada en el transcurso del desarrollo embrionario. Se necesitan centenares de proteínas para formar una célula de determinado tipo, de suerte que, en dichas células, se manifiestan muchos genes mientras se ignoran muchísimos más: los correspondientes a las proteínas de los demás tipos celulares.

El ADN contiene todos los genes y cuenta con información acerca de cuándo deben ponerse en marcha dichos genes.

## CLONES

Un clon es una colección de células derivadas de una célula única. Nuestras hermanas pequeñas, las bacterias, for-

man clones de manera rutinaria. Si se coloca una célula bacteriana en una placa de cultivo, se divide rápidamente y forma dos células, las cuales a su vez se dividen para dar lugar a cuatro, y así hasta que, al cabo de cuarenta y ocho horas, resulta visible a simple vista la colonia de células. Dicha colonia es un clon: contiene millones y millones de células que proceden de una sola célula original. Si tomamos una célula de este clon y la colocamos en otra placa, se dividirá hasta originar otro clon idéntico al primero. Así pues, la clonación es algo sencillo para las bacterias, ya que todas las células son iguales. En cambio, para un organismo superior es algo mucho más complicado, aunque teóricamente posible. Todas las células que forman un ser vivo tienen el mismo ADN, y dicho ADN contiene toda la información necesaria para fabricar por entero un nuevo individuo. Por consiguiente, al menos en teoría, es posible separar una célula de un animal, colocarla en un medio nutritivo y obtener la producción de un nuevo y completo animal, copia perfecta del original.

Dicha posibilidad ha excitado la curiosidad de los escritores de divulgación, en particular a propósito de la posibilidad de clonar hombres, es decir, de crear un hombre completo a partir de una célula humana. Tal posibilidad es extremadamente remota, aunque ya hemos visto con anterioridad que una sola célula —el cigoto— puede dar lugar, de hecho, a un individuo completo. Sin embargo, éste parece ser un proceso único; las criaturas vivientes no fabrican fácilmente nuevas copias de sí mismas haciendo que sus células especializadas comiencen a dividirse como un cigoto. Nuestras células ejercen un control estricto sobre su propio estado diferenciado: las células epiteliales, por ejemplo, no parecen concebir la posibilidad de transformarse en células musculares o de otro tipo.

Sin embargo puede argüirse que nuestras células están fijadas en sus características por su ambiente. Sepárese una cé-



lula de su medio habitual y quizá la veamos actuar súbitamente de un modo imprevisto. Dicho experimento se ha llevado a cabo con células de renacuajo, de la forma siguiente: se destruía el núcleo –y por tanto el ADN– de un cigoto de rana, y en su lugar se colocaba el núcleo de una célula del cuerpo de un renacuajo muy joven. En algunos casos, el cigoto se convertía en un joven renacuajo e incluso, a veces, llegaba a ser una rana adulta. El nuevo renacuajo era pues un clon derivado de una única célula de renacuajo. Experimentos similares de clonación han sido intentados, sin éxito, en el ratón y otros animales. El fracaso de los experimentos de clonación pone de relieve la *estabilización* de las características celulares que implica la especialización. A pesar de que el ADN de toda célula determina la potencialidad de ser otro tipo de célula, no se ejercita dicha potencialidad. La mayoría de los genes permanecen inactivos.

Para profundizar un poco más en el conocimiento de la embriogénesis, vamos a conocer qué hace que los genes se expresen o no se expresen.

## LA NATURALEZA DEL MECANISMO ACTIVADOR DE LOS GENES

La naturaleza del mecanismo activador de los genes que hace distintas a las células constituye un punto de interés, un fenómeno acerca del cual es posible plantearse muy interesantes cuestiones: ¿Cómo se activan y desactivan los genes?

Como siempre, las respuestas más claras proceden de los sistemas más sencillos. Volvamos, una vez más, a la conducta de las simples bacterias. Si se colocan algunas células en un caldo de cultivo y se añade un hidrato de carbono, glucosa, por ejemplo, las células empiezan a dividirse y aumenta rápidamente su número, hasta haber consumido toda la glucosa, momento en que se detiene el crecimiento.



Si se repite la experiencia con un grupo idéntico de células pero se les da un hidrato de carbono distinto –galactosa, por ejemplo– también aumenta el número de células pero a menor velocidad que en el caso de la glucosa, y se detiene una vez agotada la galactosa.



Cabe concluir de ello que la glucosa es mejor alimento que la galactosa, ya que pueden consumirla más rápidamente. Sin embargo, las bacterias consumen ambos hidratos de carbono, no rechazan ninguno de los dos.

Si se repite el experimento utilizando, a la vez, glucosa y galactosa, aparece un fenómeno interesante. La población aumenta rápidamente hasta que se agota la glucosa, se detiene el crecimiento unos veinte minutos y se reanuda hasta haber consumido toda la galactosa.





Las células prefieren, obviamente, la glucosa y después de un retraso de unos veinte minutos adquieren la capacidad de utilizar la galactosa, cuando se ha agotado la glucosa.

¿Qué detiene y activa los genes? El análisis de este sencillo sistema permitió, hacia finales del decenio de 1950, a los científicos franceses François Jacob y Jacques Monod realizar un brillante descubrimiento acerca del control de la expresión de los genes. Se sabe que este mecanismo actúa en las bacterias y probablemente también en organismos más complejos, como el hombre, pero no se puede dar por cierto.

¿Qué sucedió con aquellas bacterias y tan insólito empaño de glucosa? La célula bacteriana cuenta con la «maquinaria» para aprovechar la glucosa, ya que empieza a consumirla de inmediato tras serle suministrada. Esta maquinaria está compuesta por dos proteínas: un enzima que facilita la entrada de la glucosa en la célula, y otro enzima que la digiere cuando está dentro. Dos enzimas, dos genes. Parece que las bacterias no poseían la correspondiente maquinaria para tratar la galactosa, por lo menos cuando crecían con los dos hidratos de carbono, pero adquirían la de utilizarla cuando se agotaba la glucosa. O sea, la carencia de glucosa disparaba el desarrollo de la maquinaria de utilizar galactosa. La glucosa impedía o reprimía que se manifestaran los genes que controlaban los enzimas necesarios para utilizar la galactosa. Al aca-

barse la glucosa desaparece su efecto represivo, de modo que los genes para la galactosa podían empezar a formar ARN mensajeros y éstos ser traducidos en proteínas.

Creemos que éste es el significado para la bacteria: ingiere el mejor alimento disponible y, una vez en su interior, lo aprovecha de tal forma que no necesita gastar energías para elaborar enzimas para consumir otro alimento. Cuando se acaba el alimento bueno y sólo dispone del alimento peor, la bacteria se decide a formar los enzimas para poder consumirlo.

## LAS BACTERIAS NO ELABORAN LO QUE YA TIENEN

Si alguien cultivara hortalizas en su jardín por necesitarlas para su consumo y alguien decidiera proporcionárselas asiduamente, probablemente dejaría de cultivarlas. Las bacterias efectúan algo semejante. Son capaces de formar sus propios aminoácidos, los veinte eslabones esenciales de las cadenas proteínicas. Sin aminoácidos no podrían, lógicamente, elaborar sus proteínas y cesarían de multiplicarse. Pero si se les proporcionan aminoácidos ya hechos (añadiéndolos, sencillamente, a la solución en que viven las bacterias) dejan de formarlos. La adición de aminoácidos hace que las células no necesiten gastar energías en elaborarlos; se trata de cantidades considerables de energía, ya que la formación de cada uno de los veinte aminoácidos requiere varios enzimas. Para constituir cada enzima debe activarse un gen, producir un ARN mensajero y transportarlo hasta los ribosomas, donde tendrá lugar la generación de las proteínas. Inactivar un gen así supone un ahorro considerable de energía. La conservación de la energía es vital para la supervivencia de la bacteria, así como para la de toda célula viva.



## ESQUEMA DEL CONTROL DE LA MANIFESTACIÓN DE LOS GENES

He aquí una visión general de la manifestación de los genes obtenida a partir de los estudios con bacterias:

1. Se pueden activar o inhibir los genes mediante unas moléculas proteínicas, los represores.
2. Los represores se adhieren a un extremo del gen de tal modo que el enzima que lo transcribiría en ARN mensajero se ve imposibilitado de hacerlo.
3. Esto significa que la proteína es la responsable de que no se pueda realizar.
4. Los represores se sueltan del ADN por dos procedimientos:
  - a) mediante un hidrato de carbono como la glucosa (esto es, la glucosa ayuda al represor a adherirse al gen);
  - b) con ayuda de un aminoácido.

Ahora se está en condiciones de entender la explicación del experimento de la glucosa-galactosa antes descrito. Mientras haya glucosa, las bacterias la consumirán, y la propia glucosa ayudará al represor de los genes para la galactosa a mantenerlos fuera de juego. Cuando se acabe la glucosa, no podrán actuar los represores de los genes para la galactosa, de modo que se formarán los enzimas y podrán ingerir la galactosa. Asimismo, cuando haya aminoácidos en el medio de las bacterias cabe que éstos ayuden a los represores de todos los genes que intervienen en la formación de aminoácidos y, por tanto, a mantenerlos inactivos.

Parece que este tan eficaz sistema de regulación de las bacterias también se da en formas más elevadas de vida, incluido el hombre, y constituye, sin lugar a dudas, una importante manera de controlar la expresión de los genes.

## SIN EMBARGO, LOS HOMBRES NO SON BACTERIAS

Ahora bien, existe una diferencia muy significativa entre los comportamientos de las células bacterianas y los de los organismos más complejos y especializados, como el hombre. Las células bacterianas viven una vida de respuestas prontas, de flexibilidad, de ajuste rápido a los cambios radicales de su ambiente, algo parecido a la ley de la selva: cada bacteria sólo mira para sí misma. En cambio, las células especializadas están sometidas de manera permanente a un particular sistema de vida. Las células epiteliales continúan siendo células epiteliales; las células musculares, células musculares y las células cerebrales, células cerebrales durante toda la vida del organismo. En cada tipo de célula, están activados los pocos genes que determinan su carácter de epitelial, muscular o cerebral, mientras que se hallan reprimidos todos los demás —es decir, aquellos que determinan que sean hepática, ósea o renal— y así permanecen durante toda dicha vida. Por consiguiente, las bacterias necesitan dispositivos para parar o poner en marcha, de modo rápido y fácil, sus genes, mientras que las células especializadas deben tener reprimidos para siempre la mayoría de sus genes y activados algunos —pocos—, también de manera permanente, de modo que el sencillo dispositivo para activar y reprimir los genes de las bacterias puede que no sea similar al que actúa en las células especializadas. Por el momento, sin embargo, el sistema bacteriano constituye el mejor modelo del que se dispone y, en teoría, no parece difícil que pudiera trabajar como un sistema de activación-represión permanente.

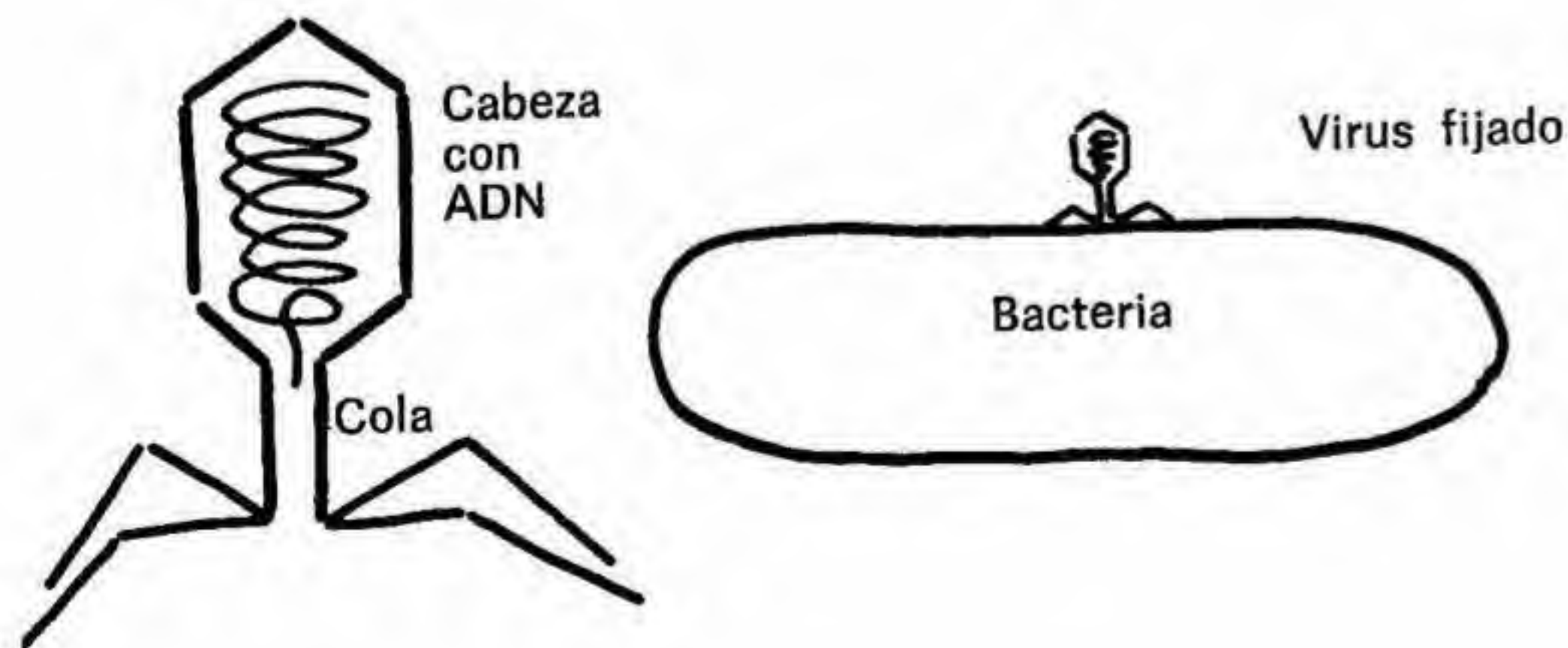
## LA GÉNESIS DE LA FORMA

Se ha considerado el arduo problema de la manifestación de los genes durante la embriogénesis, pero el aspecto que de

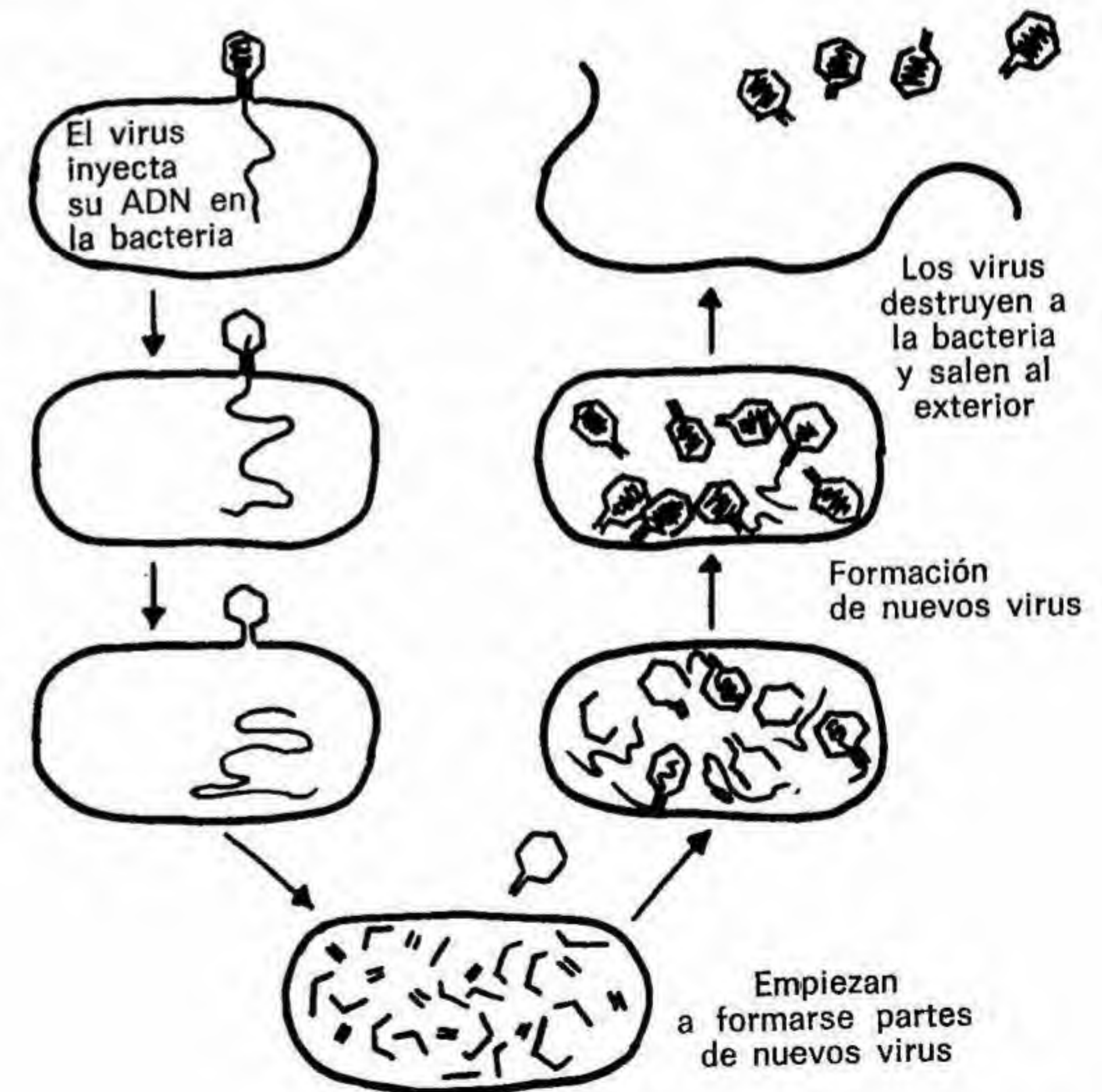


inmediato llama más la atención es la génesis de la forma: el arte del proceso escultórico, la increíble perfección arquitectónica en la formación del niño a partir del cigoto. Por ejemplo, los tejidos y órganos especiales de que está hecho el hombre están «rellenos» de esqueleto. El hueso se desarrolla en el interior del embrión junto con otras muchas estructuras. Empezando a partir de células de aspecto corriente, aparece un nuevo tejido en que puede depositarse calcio para formar una estructura dura. Dura y fortísima, construida de manera ingeniosa y capaz de soportar el peso de un organismo durante toda su vida, así como de crecer y ser reparada en caso de fractura. ¿Cómo ocurre un proceso de configurar estructuras de tales características? Se trata de un problema insidioso con que se topa a menudo y que para resolverlo se debe recurrir a un modelo.

Las bacterias, igual que las personas, están sujetas a infecciones víricas. Un virus bacteriano (denominado *bacteriófago*, que significa comedor de bacterias) tiene una «cabeza» de forma geométrica, en la cual se encuentra empaquetado el ADN y una cola, que actúa como la aguja de la jeringuilla. En el extremo de esa cola posee unas patas parecidas a las de una araña, que sirven para agarrarse a la superficie de la bacteria.



En este momento el virus inyecta su ADN, a través de la cola, en la bacteria, tal como si el virus fuera una jeringuilla, que es exactamente lo que es. Una vez en el interior de la bacteria, el virus del ADN empieza de inmediato a dar órdenes. Una señal indica al aparato de formación de proteínas de la bacteria que, en adelante, no debe elaborar más proteína bacteriana. Los ARN mensajeros producidos por el virus, a partir de su ADN, se apropian rápidamente de los ribosomas y los ARN de transferencia, de modo que la factoría bacteriana empieza en seguida a constituir proteínas víricas: nuevas cabezas, colas y fibras de la cola. El ADN del virus gobierna toda la factoría.





Poco después es posible ver cómo las partes del virus se ensamblan en el interior de la bacteria, el ADN vírico recién formado se alberga dentro de las cabezas y quedan listos nuevos virus completos. Se pueden acumular cerca de cien virus en cada célula bacteriana llenando casi por completo su cavidad y, como remate, el virus segrega un enzima que destruye la membrana bacteriana, mata la bacteria y permite salir a los nuevos virus. Este violento trastorno dura menos de media hora.

Este fenómeno constituye un modelo simple para la génesis de la forma. Las distintas partes del virus se ensamblan bajo las instrucciones exclusivas de su ADN, aprovechándose del control de la factoría. Parece tratarse de un proceso de ensamblaje con una cuidadosamente programada secuencia temporal, de modo que se activan ordenadamente los genes que controlan la manufactura de las distintas partes del virus. Existen pruebas concluyentes de que, si se elaboran en el debido orden las partes, la forma definitiva aparece de manera espontánea.

No se sabe todavía hasta qué punto ese modelo puede ser útil para interpretar fenómenos mucho más complicados de auténtica embriogénesis; sin embargo, la utilidad de ese modelo reside en que proporciona un conocimiento casi completo de la composición génica del virus (organismo mucho más simple que una bacteria), se puede controlar y manipular la secuencia de acontecimientos y permite seguir tranquilamente la génesis de una forma tridimensional no demasiado complicada con el microscopio electrónico.

## INICIO Y CESE DE LA DIVISIÓN CELULAR

Un embrión es una masa de células que se dividen rápidamente. Este vigoroso desarrollo continúa después del naci-

miento y durante la infancia de forma desacelerada, y cesa al alcanzar el estado adulto. Las células de cada órgano, de cada tejido, finalizan su desarrollo de un modo cuidadosamente coordinado. ¿Cómo saben las células cuándo deben detener su crecimiento? ¿Qué les indica que los órganos de los cuales forman parte han alcanzado su tamaño definitivo?

Puede observarse este fenómeno en el comportamiento de células normales fuera del organismo. Para ello se cultiva en la superficie de una cápsula de vidrio, en una capa de una sola célula de grosor y siempre en contacto con sus vecinas más inmediatas: cuando las células más exteriores alcanzan los bordes de la cápsula, todas las células dejan de dividirse.

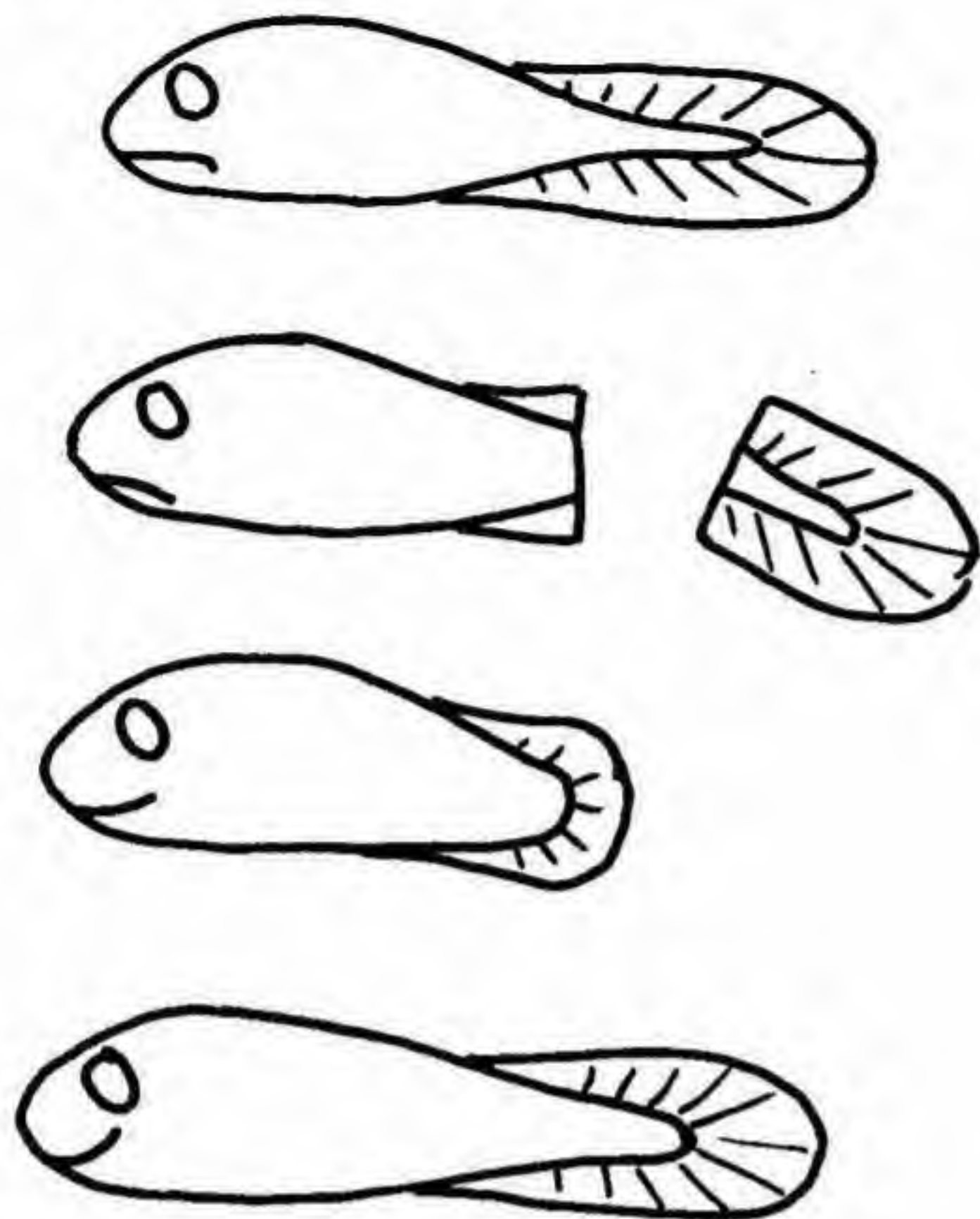
¿Qué naturaleza tienen las señales de cese de la división celular? No se sabe y se continúa buscando. Existe un modelo que nos pone a prueba y que puede aportar la solución a, por lo menos, una parte de ese rompecabezas. Sentimos especial simpatía por él por cuanto le hemos dedicado muchos años, fascinados por su significado.

## REGENERACIÓN

Si cortamos la cola de un renacuajo y lo devolvemos al agua, el muñón sana rápidamente y en el transcurso de las siguientes tres semanas sucede algo en extremo maravilloso: aparece una cola totalmente nueva.

Completa y perfecta. Una salamandra restaura, de manera similar, una pata si se le amputa; una estrella de mar y una langosta hacen lo mismo. Este fenómeno, denominado regeneración, también se da en el hombre. Éste no puede restaurar piernas ni brazos pero si, por ejemplo, un accidente daña el hígado y resulta imprescindible la amputación quirúrgica de parte de él, el resto regenera el órgano hasta su tamaño original, en unos pocos días. Esta situación particular se pue-





de simular en el laboratorio. Se amputa quirúrgicamente las dos terceras partes del hígado de una rata. La rata tarda algunos minutos en recuperarse de la anestesia y empieza a comer a las pocas horas; al cabo de tres días se han regenerado los dos tercios del hígado amputado y la víscera es ya normal y sana, y realiza todas sus funciones específicas.

En los casos anteriores suceden dos acontecimientos espectaculares. Por un lado, la amputación de una parte del animal inaugura un proceso rapidísimo de división celular en el lugar de la amputación, donde antes sólo había quietud. Por otro, cuando ya se ha regenerado la parte amputada, cesa la división celular. Lo increíble de este fenómeno es que las células de la parte adyacente a la amputada han «sabido» tanto la necesidad de empezar a dividirse como la de cesar cuando ello ha sido suficiente.

¿Qué hay en el interior de estas células que les indica que han de comenzar a dividirse y que deben parar cuando ya se han dividido lo suficiente para restaurar la parte del órgano perdida? En otro tiempo intentamos encontrar la solución separando células de un hígado que se estaba regenerando y mezclándolas con células provenientes de un hígado normal, o sea, que no se estaba dividiendo. Pensábamos que si existía una «señal» química en las células del hígado que se estaba regenerando que las llevaba a producir más copias de sí mismas, dicha señal podría influir en las células normales y conseguir que elaboraran más rápidamente proteínas, o si, por otro lado, las células normales contenían una señal química capaz de lograr que las células del hígado que se estaba regenerando retardaran su funcionamiento, podríamos detectarlo. Una buena idea, una buena utilización de un modelo válido, pero los experimentos no aportaron pruebas concluyentes. El sistema es más complicado y se resiste a nuestras investigaciones.

En la historia de los repetidos éxitos en la elucidación de las leyes de la vida, parece que un fracaso experimental no tiene lugar en ella, pero, por el contrario, aumenta su veracidad. La mayor parte de los experimentos científicos han sido, en realidad, un fracaso, y lo cierto es que los científicos aprenden de estos fracasos, que les ayudan a idear mejores experimentos con los que, finalmente, conseguir un nuevo descubrimiento.

Un colega nuestro, la doctora Nancy Bucher, ha contribuido probablemente más que cualquier otro científico a los conocimientos actuales acerca de la regeneración. Parte de sus importantes trabajos consistían en hacer gemelos siameses en ratas. Cosía una rata con otra hasta conseguir que se estableciera entre ambas una buena circulación, que la sangre fluyera fácilmente entre ambas. Entonces amputaba dos tercios del hígado de una rata, y mientras el hígado de ésta se



regeneraba observaba si el hígado de la otra rata empezaba a crecer. Y crecía, lo cual quiere decir que el hígado que se estaba regenerando producía alguna sustancia que pasaba al torrente circulatorio desde donde llegaba al otro hígado, normal, y hacía que empezara a crecer. Tanto la doctora Bucher como otros muchos científicos han intentado averiguar cuál podía ser dicha sustancia, pero no han tenido, por el momento, ningún éxito en su búsqueda.

## SE SABE MUY POCO ACERCA DE LA EMBRIOGÉNESIS

Se han considerado algunos puntos interesantes acerca de la embriogénesis: la capacidad de las células que se están dividiendo para adquirir la de agregación necesaria para mantenerse unidas, el surgimiento de la especialización necesaria para constituir un organismo complejo, la génesis de las formas y, finalmente, la señal de cese, indispensable para llevar a término el largo proceso de la embriogénesis, la infancia y la adolescencia. Se trata solamente de unos pocos aspectos destacados de un proceso increíblemente complicado. Lo que no sabemos rebasa todavía todo cuanto conocemos, aunque ello no sorprende pues parece que la embriogénesis constituye un enigma que exige que el hombre utilice al máximo todas sus facultades. Está relacionado con las auténticas raíces de la biología y, sin embargo, es muy sugeridor porque parece que no hay nada en la embriogénesis que sea demasiado difícil como para no poder resolverlo. Creemos que pronto habremos penetrado en los arcanos de la embriogénesis de la misma manera que ya conocemos las leyes universales de la vida, expuestas en los primeros capítulos.

La naturaleza de los problemas planteados por la embriogénesis es muy parecida a la de los que comporta el cáncer, y algunos investigadores creen que la explicación del cáncer re-

querirá un conocimiento previo de la embriogénesis. El cáncer, en ciertos sentidos, parece representar la pérdida de aquella soberbia cualidad de control que se aprecia en la embriogénesis. Así, por ejemplo, el desordenado comportamiento de las células cancerosas podría estar relacionado con la pérdida de la agregación celular. Seguidamente se analizarán más detalladamente estas cuestiones.



## 8. Cáncer

La perturbación comienza cuando en el interior de la célula normal acontece algo que la convierte en cancerosa. Este origen unicelular del cáncer justifica que un capítulo sobre esta enfermedad resulte apropiado en un libro acerca de los principios de la vida.

### BERILIO Y CÁNCER

El berilio produce en el conejo un tipo de cáncer óseo muy maligno. Esto se descubrió en la época en que el autor empezaba su carrera de investigador, cuando unos científicos se dedicaron a estudiar la muerte de trabajadores de la industria de las lámparas fluorescentes; sus pulmones se veían seriamente dañados por los materiales utilizados en los tubos. Los investigadores inyectaron el material fosforescente, que contiene berilio, a animales, a los cuales les aparecían cánceres de hueso al cabo de unos meses. Dicho cáncer crecía rápidamente, se extendía a otras partes del cuerpo y la muerte del animal era cuestión de semanas. (El berilio nunca produce cáncer al hombre, pero daña sus pulmones y por dicho motivo ya no se usa en la fabricación de las lámparas fluorescentes.)

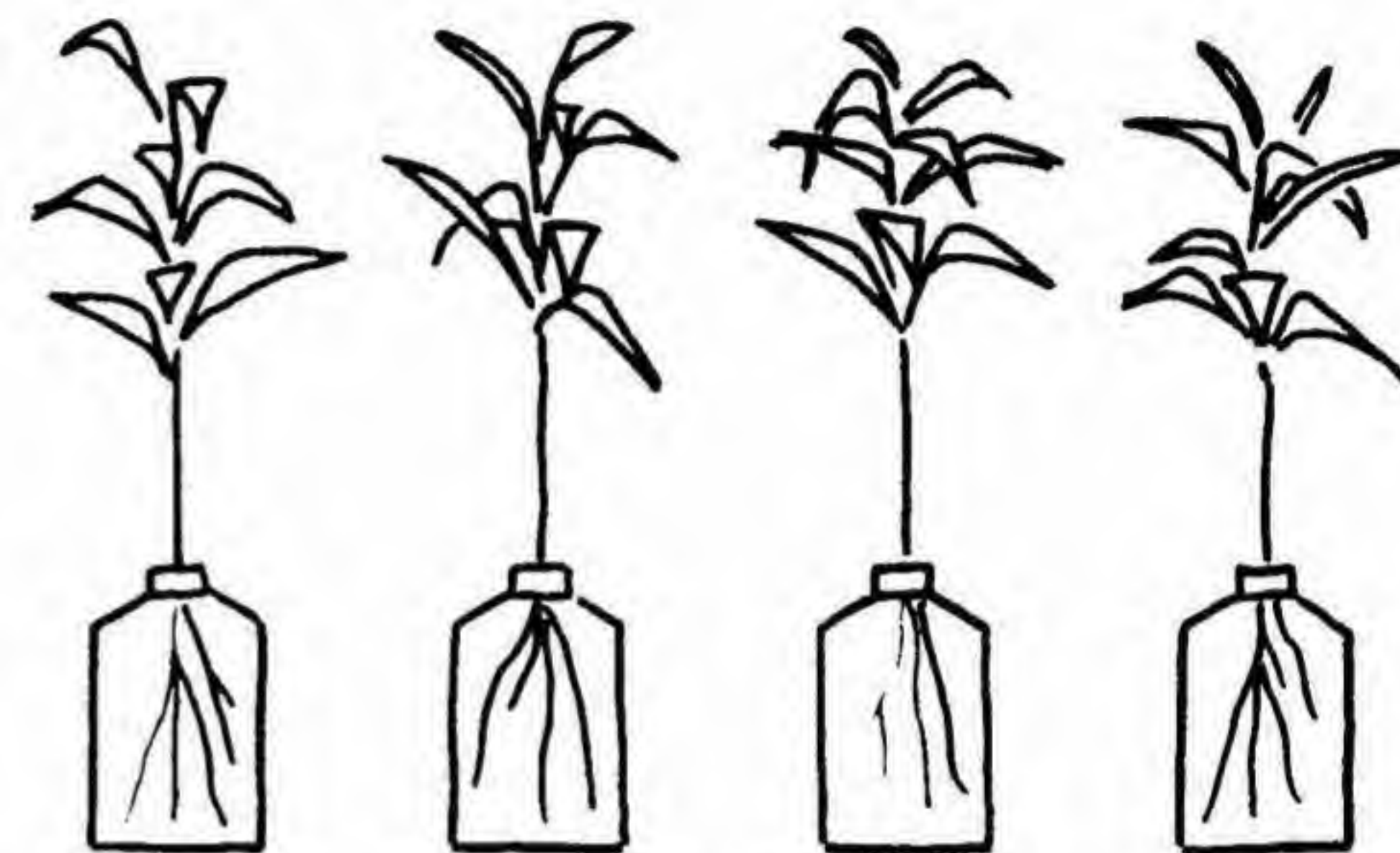


Recién salido de la facultad de medicina, el autor se impuso la tarea de averiguar algo más sobre cómo el berilio produce el cáncer óseo. En primer lugar estudió, en la biblioteca, qué científicos habían descrito aspectos de la acción del berilio sobre los sistemas vivientes. Se sabía muy poca cosa. Se conocía, sin embargo, algo interesante: el berilio, en cantidades pequeñísimas, detiene la acción de la fosfatasa en el cuerpo. Este enzima tiene particular importancia por cuanto contribuye al depósito de fosfato cálcico, el material que confiere dureza al hueso. También se sabía que la fosfatasa necesita corrientemente la presencia del metal magnesio para poder actuar. La estructura del berilio es muy parecida a la del magnesio, de donde resulta obligada la pregunta. ¿Es venenoso el berilio por algún tipo de oposición con el magnesio? La respuesta fue afirmativa: el berilio pasa a formar parte del enzima, en sustitución del magnesio, y, como consecuencia de ello, lo paraliza.

## EL BERILIO Y EL DESARROLLO

En este punto entraba el autor. Al considerar el problema se le ocurrió algo que le pareció una buena idea: ¿Por qué no trabajar con un modelo sencillo que requiriera magnesio para su crecimiento? Si se pudiera demostrar que el berilio tenía algún efecto sobre el desarrollo y fuera posible probar que dicho efecto estaba relacionado con la necesidad de berilio que experimentaba el sistema, se avanzaría un poco en el conocimiento de cómo el berilio afecta al desarrollo. El modelo simple que escogió para trabajar fue el desarrollo vegetal. La molécula de clorofila de las plantas siempre contiene magnesio. La clorofila, igual que algunos enzimas, no puede funcionar sin magnesio. El berilio reemplazaría al magnesio en la clorofila y alteraría, el crecimiento de las plantas.

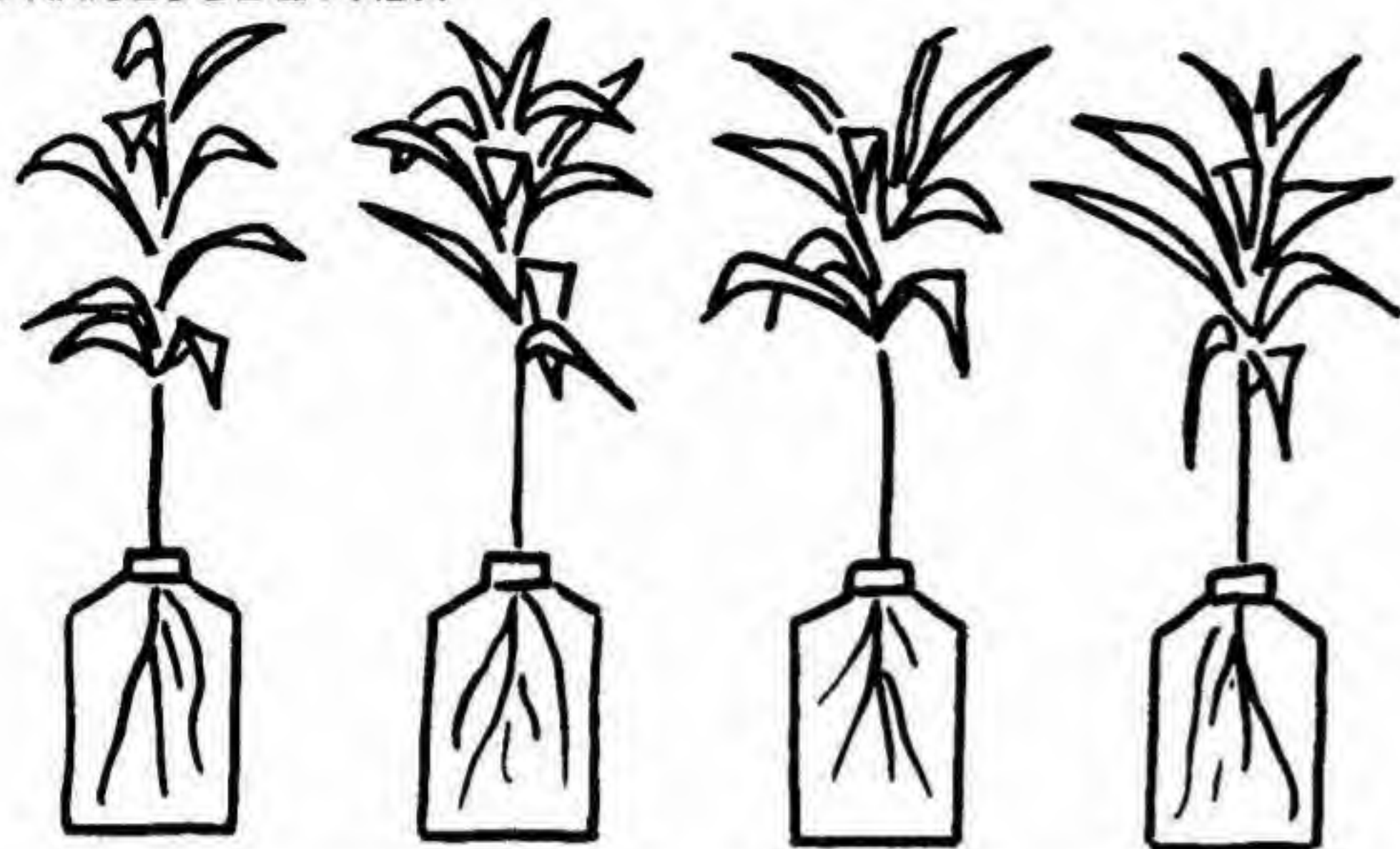
Empezó el trabajo con tomateras, cultivadas en un invernadero en botellas que contenían una solución con todos los nutrientes necesarios, incluida una cantidad normal de magnesio. Dichas plantas se desarrollaron normalmente durante semanas.



Dosis necesaria de magnesio

Se cultivó otro grupo de tomateras en un ambiente similar pero se había añadido berilio a la solución. Su desarrollo fue idéntico al del grupo de plantas cultivadas sin berilio.

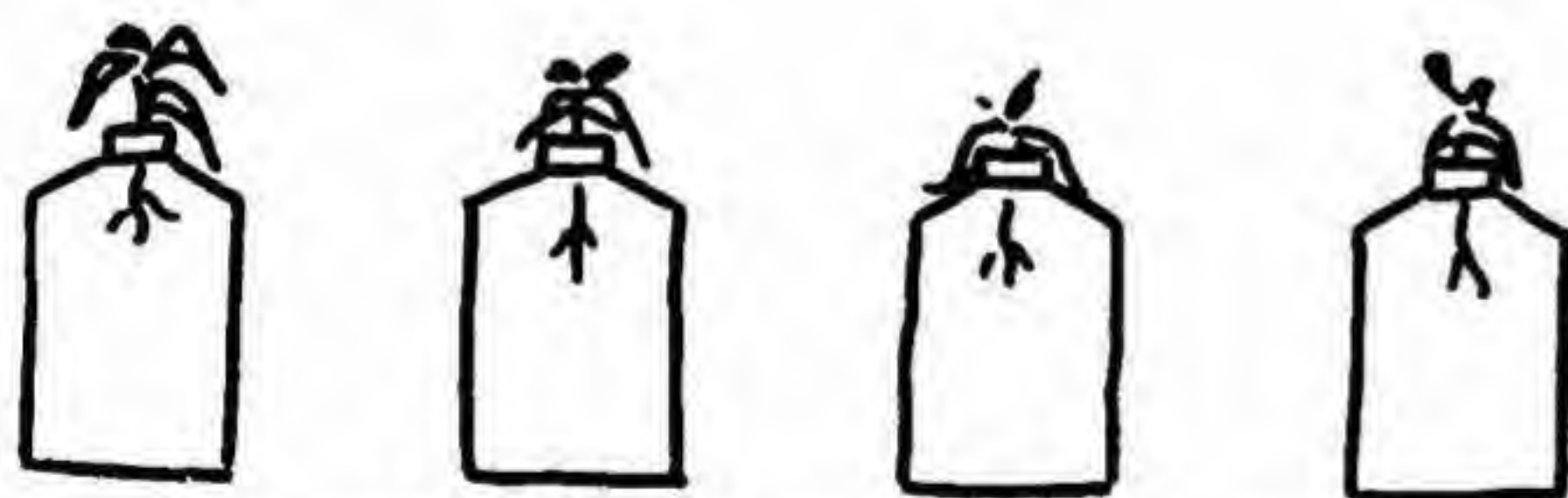




Dosis necesaria de magnesio, y berilio

De modo que podía concluirse que el berilio no ocasionaba ningún problema cuando abundaba el magnesio.

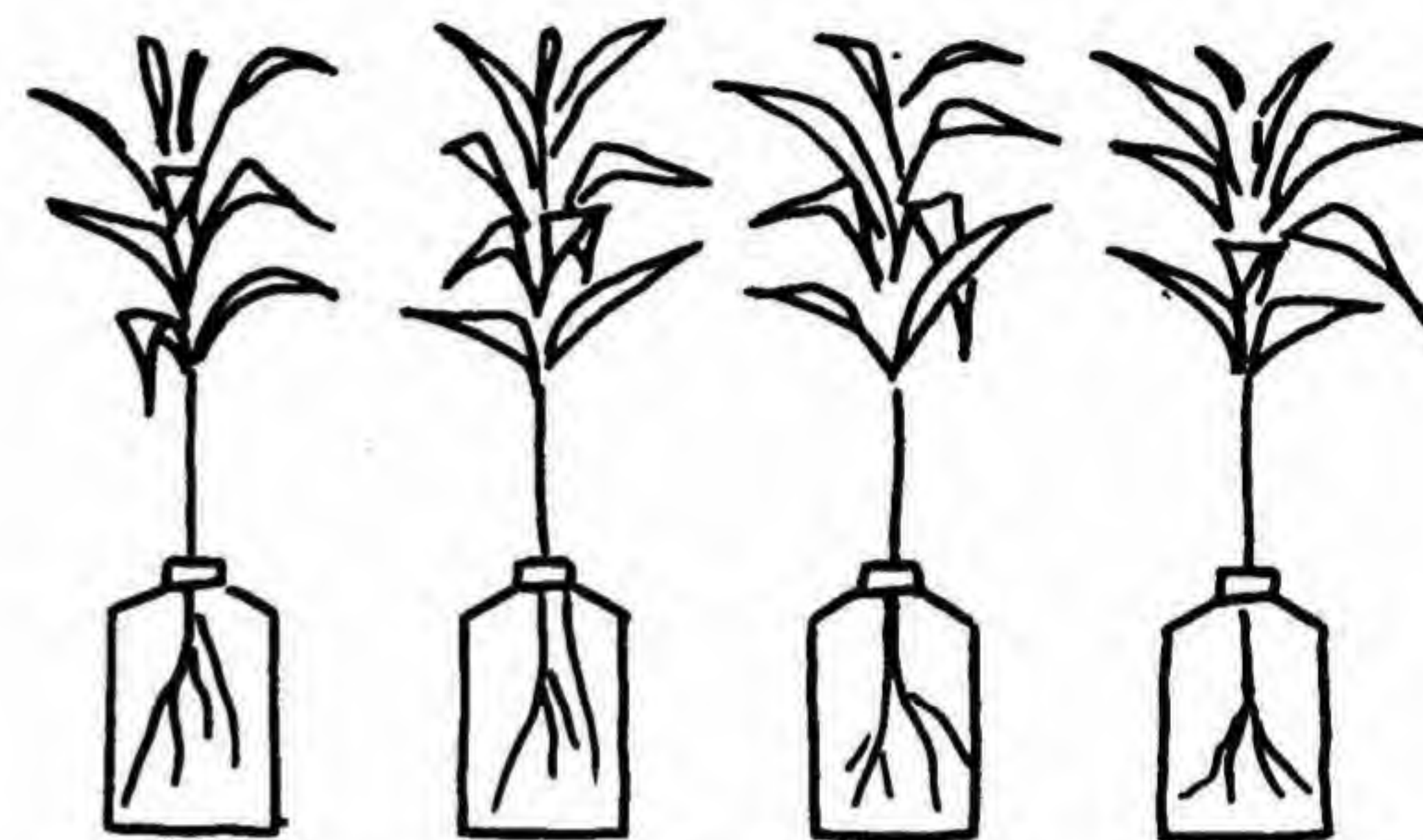
También se cultivó un tercer grupo de tomatas, cuya solución sólo contenía la mitad de la cantidad de magnesio que había en las demás. Estas tomatas crecieron durante una semana, después se volvieron amarillas, se marchitaron y murieron.



Mitad de la dosis necesaria de magnesio

Era el efecto esperado de la deficiencia de magnesio: no bastaba la mitad de la cantidad de magnesio. A un cuarto

grupo de tomatas se le privó también de la mitad del magnesio, igual que el grupo tercero, pero recibió también la misma cantidad de berilio que el segundo grupo. El resultado fue espectacular y esperanzador: las tomatas se desarrollaron vigorosamente y alcanzaron un aspecto parecido al de los grupos primero y segundo.



Mitad de la dosis necesaria de magnesio, y berilio

La conclusión era obligada: el berilio puede sustituir, al menos, la mitad de los requerimientos de magnesio de la planta y permitir un desarrollo bastante normal a las plantas sentenciadas a morir por la carencia de magnesio.

Estupendo hasta aquí. El siguiente paso era comprobar si había entrado algo de berilio en las moléculas de clorofila en sustitución del magnesio. Analizó la clorofila de los cuatro grupos de tomatas y, para su desdicha, constató que todas tenían magnesio y que ni siquiera había rastros de berilio. Esto le desanimó pero no tenía nada que objetar.

Y, sin embargo, no había duda que el berilio desempeñaba alguna función que normalmente desarrolla el magnesio.



Repitió todos los experimentos utilizando cultivos de algas verdes unicelulares y obtuvo los mismos resultados.

¿A qué viene contar esto aquí? En primer lugar, porque constituye un intrigante problema de la investigación sobre el cáncer, es decir, un desconcertante y misterioso modelo que pide ser resuelto. En segundo lugar, porque ilustra lo que a menudo se encuentra en la investigación: una idea conduce a un claro resultado esperado de antemano, aunque la explicación prevista no concuerda y se necesita una idea mejor. En tercer lugar, porque la experiencia del autor con el problema del berilio le convenció, en un momento crucial para su carrera, de que podía formular una idea y confrontarla mediante experimentación y de que, por tanto, tenía futuro en la investigación. Que su teoría estuviera equivocada no debía turbarle, pues la mayoría de las ideas no son ciertas y un investigador puede considerarse muy feliz si en el transcurso de toda su vida formula algunas acertadas.

Prosiguió con ese tema durante dos años más y publicó algunos descubrimientos interesantes que mostraban cómo el berilio compite con el magnesio en los enzimas vegetales dependientes del magnesio. Pero ni el autor ni nadie ha sido capaz, desde entonces, de explicar los efectos de un simple metal en el hueso del conejo, de decir algo acerca de su papel en el desarrollo vegetal: un problema importante no resuelto que espera una solución ingeniosa. Es decir, que la producción de cáncer por un simple metal plantea, ciertamente, una ocasión de demostrar sus aptitudes a los científicos mejor preparados.

## ¿QUÉ ES EL CÁNCER

He ahí una descripción realista de lo que es el cáncer. En una primera aproximación, cabe decir que el cáncer es una conducta anormal, heredable, de las células. Esta particular

conducta anormal puede iniciarse, en cualquier momento, en cualquier célula en no importa qué parte del cuerpo. Hay dos tipos principales de conducta celular cancerosa: *Primero*, las células cancerosas se multiplican relativamente más deprisa que sus vecinas normales. Como se ha visto en el último capítulo, las células normales tienen un período de crecimiento pero, concluido éste, se detiene. Las células del hígado que se está regenerando también crecen pero paran cuando el hígado ha alcanzado su masa original. Las células cancerosas nunca dejan de dividirse mientras tengan suficiente alimento. *Segundo*, las relaciones de las células cancerosas con sus vecinas normales están alteradas, de modo que se vuelven, relativamente, más independientes, asociales y descorteses. La agregación celular, la tendencia de las células que se están dividiendo de permanecer juntas en un agregado gracias a las proteínas especiales de su superficie, constituye un rasgo importante de la embriogénesis. La pérdida de esta importante propiedad de la célula normal parece constituir un factor capital para el desencadenamiento de la malignidad.

La combinación de estas dos características –aumento de la tasa de división celular (desarrollo) y pérdida de la agregación celular– es mortífera. Significa la aparición de un nuevo y «extraño» tejido que se desarrolla, de manera desordenada, en el cuerpo y que rápidamente se extiende más allá de su punto de origen. Las células cancerosas pueden producir finalmente metástasis, es decir, alcanzar, a través del torrente circulatorio, otras partes del cuerpo donde desarrollan nuevas colonias y con el transcurso del tiempo, estas infatigables células acaban matando el cuerpo en que nacieron.

## CÁNCER FUERA DEL CUERPO

Cuando los médicos investigadores pueden sacar un problema del cuerpo y colocarlo en sencillas cápsulas de vidrio



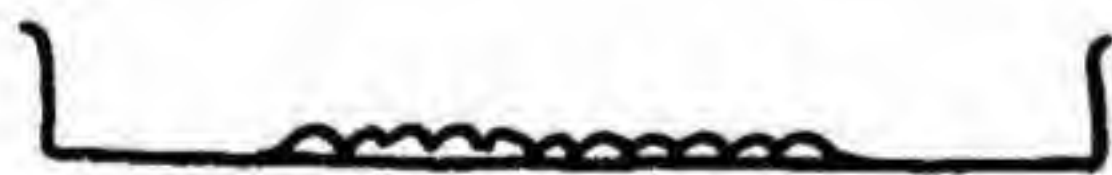
(el equivalente moderno del tubo de ensayo) se muestran optimistas acerca de las posibilidades de resolverlo, ya que ello significa que se podrán contrastar sus ideas con experimentos sujetos a discusión en un sistema controlable. El cáncer es, como se sabe, una afección de las células, y éstas se pueden sacar del cuerpo y estudiarlas en cápsulas de vidrio en el laboratorio. Existen pocas enfermedades humanas que sea posible estudiarlas de un modo tan fácil.

¿Cuál es el comportamiento de las células cancerosas y el de las normales en cápsulas de cultivo? En primer lugar, se colocan algunas células normales en el centro de una cápsula y se recubren con un líquido alimenticio.



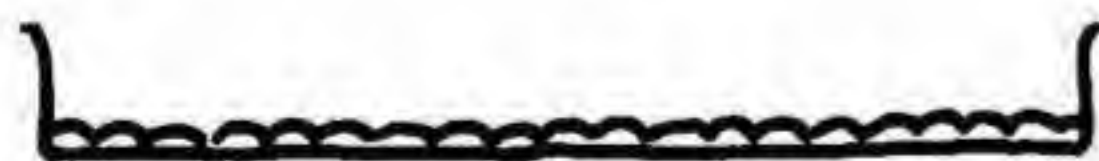
Vista lateral de una cápsula de vidrio con una célula normal colocada en su centro

Durante un período de varios días las células se dividen repetidamente, y siempre se mantienen en contacto con el vidrio y entre sí.



Unos días después, las células en división están cubriendo la cápsula en una capa monocelular

Cuando las células alcanzan el borde de la cápsula cesa su crecimiento.



En cuanto las células han alcanzado los márgenes de la cápsula, se ha detenido la multiplicación

Desde este momento, las células permanecen en contacto, forman una capa unicelular estable. Si, por ejemplo, se eliminan algunas células de la cápsula, las próximas a la «interrupción de la continuidad» empiezan a dividirse y vuelven a llenar el agujero. Cuando dicho agujero está nuevamente relleno por una capa de una célula de grosor, vuelve a cesar la división celular.

Este tipo de comportamiento es más sencillo que el de las células regeneradoras pero en el fondo semejante a él: la división continúa vigorosamente hasta que se alcanza algún límite presente, el tamaño original del órgano. Ambos sistemas demuestran de manera convincente que las células normales «saben» cuándo han de detener su crecimiento.

Ahora toca considerar el comportamiento de las células cancerosas; se colocan algunas en el centro de una cápsula de cultivo y se observan.



Célula cancerosa situada en el centro de una cápsula de vidrio

Las células se dividen, recubren el vidrio y presentan un aspecto no demasiado distinto del de las células normales.



Unos días después, las células se están dividiendo



Las células continúan dividiéndose a pesar de haber alcanzado los márgenes de la cápsula



Pero cuando alcanzan el borde de la cápsula termina cualquier similitud con las células normales.



Las células continúan dividiéndose

Continúan dividiéndose en más y más células que se amontonan, unas encima de las otras, de manera desordenada: parece que las células han «olvidado» la señal de parar su desarrollo. En este caso, la disponibilidad de nutrientes es lo único que puede impedir que continúe el crecimiento. Las células cancerosas muestran una propiedad que no poseen las demás células: la de crecer indefinidamente.

Y, desde luego, algunas células cancerosas se continúan desarrollando fuera del cuerpo de sus víctimas desde hace mucho tiempo. El caso más famoso es el de Henrietta Lacks, quien, en 1951, fue operada de un cáncer cervical, y murió posteriormente a causa de dicho cáncer. Algunas de sus células cancerosas se cultivaron con nutrientes artificiales en cápsulas de vidrio donde siguieron dividiéndose. Se las conoce con el nombre de células HeLa, las cuales, vivas todavía, continúan dividiéndose y constituyen las células más comúnmente utilizadas en la investigación del cáncer.

Del mismo modo que en el cuerpo, en las cápsulas de vidrio, cuando hay cáncer se han perdido los límites que la célula normal aplica a su alrededor, así como la inhibición de la división celular que ocurre cuando las células han rellenado cierto espacio y alcanzado determinada masa original.

Pero puede hacerse algo más en las cápsulas de vidrio: inducir a las células normales a volverse cancerosas; por inoculación de agentes cancerígenos, especialmente algunos virus, a animales, es posible transformar, fuera del cuerpo, células

normales en células cancerosas. Esto interesa mucho al científico porque supone poder estudiar en el laboratorio, fuera del cuerpo, cada paso del proceso causal en condiciones controladas.

## APORTE DE SANGRE PARA EL CÁNCER

Cabe argüir que el desarrollo celular en las cápsulas de vidrio no es típico y que sería más representativo del desarrollo de las células cancerosas en el cuerpo si dicho cultivo se efectuara tridimensionalmente en algo más parecido a un tejido blando. Cuando se procede así, las células cancerosas se dividen hasta formar una pelotita visible a simple vista. Y de ahí no pasan, aparentemente por no disponer de un adecuado acceso al alimento suministrado. Si, por el contrario, cerca del lugar existen vasos sanguíneos, la pelotita de células cancerosas estimulará la formación de nuevos vasos sanguíneos, los cuales crecen en el interior de la masa cancerosa y pronto las células cancerosas vuelven a dividirse otra vez y, en la medida en que los vasos sanguíneos aportan nutrientes al cáncer y crecen simultáneamente con él, la masa cancerosa puede llegar a ser bastante grande. Así se forman los cánceres en el cuerpo: no pueden crecer sin su propio aporte sanguíneo. Esta importante investigación, realizada por Judah Folkman, muestra también que las células cancerosas segregan alguna sustancia, cuya naturaleza se está investigando actualmente, que produce el crecimiento de los vasos sanguíneos. Si se supiera de qué se trata, quizá se lograría actuar contra el cáncer matándolo de hambre.

## ¿SE DEBE EL CÁNCER A UNA MUTACIÓN?

¿Qué causa imaginable puede inducir a la célula a desarrollar estas atroces propiedades? No se sabe. El quid estriba



en saber qué desencadena la transformación, pero hay varios aspectos de la aparición del cáncer en el organismo que sugieren la presencia de una mutación, es decir, la alteración del ADN de una sola célula.

1. Parece que el cáncer se inicia siempre como un cambio súbito en una sola célula.
2. Cuando la célula se ha vuelto maligna, todos sus descendientes serán también malignos: el carácter maligno se hereda.
3. Da la impresión de que las células cancerosas poseen una ventaja selectiva sobre las células normales de las que proceden.
4. La mayoría de los cancerígenos, tales como algunas sustancias químicas, rayos X y radiación ultravioleta, producen también mutaciones.

Por todo ello, no resulta descabellado suponer que la causa inmediata del cáncer sea un cambio en el ADN, es decir, una mutación.

## VIRUS Y CÁNCER

Determinados tipos de virus pueden producir cáncer, lo cual presenta una interesante relación con lo dicho acerca de las mutaciones.

Se recurre de nuevo a un modelo muy sugestivo, que ha inspirado buena parte de la investigación actual sobre el cáncer.

Aquí vuelve a salir a colación lo dicho acerca de determinados virus predadores de bacterias. Inyectan su ADN en la bacteria y a partir de ahí toda la maquinaria de la bacteria se ve obligada a producir más virus.

Pero, a veces, después de haberse introducido el ADN del virus en la célula bacteriana sucede un fenómeno bastante extraño e inesperado: el ADN del virus se resguarda pacíficamente en el interior del ADN bacteriano; los genes del virus se combinan con los genes de la bacteria, y no se forman nuevos virus. La célula bacteriana sigue dividiéndose como si nada hubiera pasado, pero ha ocurrido algo que tiene un profundo significado: la bacteria infectada y todos sus descendientes contienen el ADN del virus y, en consecuencia, presentan propiedades y conductas modificadas.

¿Qué sucede? Que, ahora, los genes del virus formando parte del ADN de la bacteria entran en funcionamiento. Dictan la fabricación de ARN mensajeros, que se trasladan a los ribosomas de la bacteria, donde dirigen la síntesis de nuevas proteínas. Estas proteínas pasan a ser constituyentes de las bacterias y, por tanto, alteran su naturaleza. En suma, que la bacteria y todos sus descendientes han cambiado debido a la presencia de los genes del virus, ahora integrante del ADN de la bacteria.

Se trata de un comportamiento francamente molesto por parte de algunos virus. Destaca su significación respecto al cáncer si se piensa que muchos cánceres de los animales están producidos por virus, y que los virus cancerígenos se comportan en las células animales de manera muy parecida a como actúan los virus bacterianos en estas últimas. Penetran en las células, parece que desaparecen, su ADN se combina con el de la célula de modo que las propiedades de la célula quedan permanentemente alteradas. Dicha alteración es la causa de su nocividad.

Si se consideran conjuntamente virus y mutación es posible establecer una generalización significativa: nuevos genes procedentes de virus o genes alterados provenientes de mutaciones pueden ocasionar la formación de nuevas proteínas en la célula, las cuales, a su vez, cabe que desencadenen un cre-



cimiento más rápido, cambios de la superficie celular asociados con una conducta poco social así como otras propiedades cancerosas.

## PARECE QUE MUCHOS CÁNCERES NO ESTÁN PRODUCIDOS POR VIRUS

Hay gran número de cánceres, incluidos todos los cánceres humanos, que no parece que estén producidos por virus, lo cual no quiere decir necesariamente que no están producidos por ellos. Precisamente el fenómeno que se acaba de describir haría muy difícil detectar los virus en un cáncer, ya que existe la impresión de que el virus permanece quieto y escondido.

## LA RESPUESTA DEL CUERPO ANTE EL CÁNCER

Cuando se dice que las células cancerosas son asociales y que tienden a disgregarse y a no asociarse se hace referencia a un fenómeno de superficie. La célula cancerosa se separa de las células vecinas por un fenómeno de contacto célula-célula, por un choque superficie-superficie. Esto significa que la superficie de las células cancerosas se ha hecho bastante distinta de la superficie de las células de que provienen, tal como se ha demostrado experimentalmente.

Si la superficie de la célula cancerosa se diferencia de la de la célula normal, ¿puede afirmarse que es «extraña»? o dicho de otra manera, ¿es dicha superficie lo suficientemente distinta como para parecer extraña al sistema inmunológico de defensa del cuerpo? Parece que la respuesta es afirmativa. Se supone que las células cancerosas provocan respuestas inmunológicas, esto es, que el cuerpo reacciona enérgicamente en un intento de destruir las células cancerosas. Este dato

abre una puerta a la esperanza, ya que si el propio cuerpo se defiende contra el cáncer sería posible reforzar sus defensas por medio de una vacuna, utilizando principios ya familiares en el tratamiento de las enfermedades infecciosas.

## CÁNCER Y AMBIENTE

Una rápida acumulación de observaciones apoyan el punto de vista de que el cáncer es producido por lo que comemos, bebemos, respiramos o por lo que nos relacionamos de algún modo. Este aserto es de tres tipos. En *primer lugar*, porque la frecuencia de cuantiosos tipos de cáncer difiere mucho de unas regiones geográficas del mundo a otras. En *segundo lugar*, porque cuando colectivos humanos se desplazan permanentemente de un país a otro, la frecuencia de algunos tipos de cáncer cambia en su descendencia. Por ejemplo, cuando los japoneses emigran a los Estados Unidos la relativamente alta tasa de cáncer de estómago que sufren en el Japón decae en sus descendientes hasta un quinto de su valor, la misma que en el resto de los norteamericanos. Por su parte, los orientales presentan baja frecuencia de cáncer de mama pero cuando se desplazan a los Estados Unidos, aquélla aumenta seis veces. En *tercer lugar*, hay que señalar que se empieza a mostrar cierta prevención frente al incremento del número de contaminantes químicos presentes en el aire, en el agua y en los alimentos y de los cuales se sabe que son cancerígenos.

Este conocimiento es esperanzador en un sentido, porque ofrece la posibilidad de que se sea capaz de erradicar el cáncer controlando la contaminación del ambiente, sin olvidar que esto resulta difícil de conseguir. Como prueba de ello está la incapacidad que ha mostrado la sociedad para reducir el consumo de cigarrillos a pesar de que en los últimos quince



años se han obtenido conocimientos totalmente demostrativos de su papel como causa principal de uno de los más malignos tipos de cáncer, el de pulmón, que mata anualmente cerca de cien mil personas.

## LA CAUSA INMEDIATA EN COMPARACIÓN CON LA CAUSA DISTANTE

Debe entenderse que los virus, la mutación y las causas ambientales del cáncer no se oponen ni son contradictorios. Las mutaciones y los virus son maneras directas de cambiar el ADN, y, por tanto, de producir cáncer. Pero las mutaciones deben ser causadas por algo y es posible que los contaminantes químicos del ambiente sean los agentes culpables que penetran en nuestros cuerpos y alteran el ADN. Los virus, por su parte, pueden requerir una activación previa por los contaminantes del ambiente antes de poder producir el cáncer. En este sentido, la contaminación química del ambiente es la causa distante o mediata, mientras que la mutación o el virus son las causas más inmediatas.

Sería un gran error pensar que puesto que la contaminación química del ambiente puede producir cáncer hay que abandonar las investigaciones acerca de las causas inmediatas. No es seguro que se pueda controlar el ambiente, y, por otro lado, el cáncer constituía ya un azote mucho antes de que la industria envenenara el ambiente. El único camino seguro para poder llegar algún día a prevenir el cáncer o a curarlo es estudiar a fondo lo que sucede dentro de las células cuando toman el camino mortífero de la malignidad.

## ¿PUEDE DETENERSE EL CRECIMIENTO DEL CÁNCER?

Algunos tipos de células cancerosas son capaces de volver otra vez al estado normal. Ello demuestra que el estado

canceroso no es necesariamente irreversible, que en las células cancerosas permanece un potencial de normalidad. Estas afirmaciones se basan en los experimentos llevados a cabo por Beatrice Minz en el Fox Chase Cancer Center de Filadelfia. Algunos tipos celulares de cánceres, denominados teratomas, son insertados en embriones tempranos de ratón cultivados en placas de cultivo. Posteriormente, dichos embriones son implantados en el útero de ratones hembra. Los ratones resultantes son una mezcla de sus propias células y de las células del teratoma, que se han convertido en normales. La presencia de las células cancerosas es detectada por el hecho de que se puede comprobar que sus genes trabajan: así, por ejemplo, un ratón de padres de pelaje oscuro presentará manchas de pelo blanco determinadas por los genes de las células cancerosas transformadas ahora en normales y que activan funciones que nunca habían activado cuando eran malignas. De ahí se deduce que el ambiente celular en el embrión es importante tanto para suprimir el estado canceroso como para fomentar la expresión del estado normal. En el embrión, las células cancerosas permanecen como células independientes y nunca se mezclan con las células normales vecinas: simplemente pierden sus propiedades cancerosas. Crecen y expresan sus genes como las células de ratón normales de las que derivaban originariamente.

Aunque desconocemos en qué medida estos descubrimientos son generalizables —el trabajo experimental ha sido llevado a cabo únicamente en un tipo peculiar de cáncer, el teratoma— resultan importantes porque proporcionan una evidencia más del control del crecimiento canceroso; las células cancerosas pueden ser reconducidas al estado normal por factores existentes normalmente en el embrión de desarrollo. Ciertamente, este descubrimiento es rico en implicaciones.

Otras cosas más artificiales pueden detener también el crecimiento de las células cancerosas. Los rayos X y otros ti-



pos de radiación matan a las células cancerosas. Existe toda una variedad de productos químicos que se utilizan corrientemente para detener o retardar el crecimiento de las células cancerosas en el hombre. Incluso las hormonas, que son importantes reguladores de la función celular, son efectivas. La mayoría de estas sustancias interfiere con algún proceso vital del interior de las células cancerosas. Desafortunadamente, presentan efectos similares sobre las células normales del cuerpo, de modo que el médico debe escoger un tratamiento combinado de fármacos y radiación que pueda matar a las células cancerosas y cause un mínimo daño a las células normales del paciente.

Resulta razonable suponer que llegaremos a ser capaces de tratar con éxito o prevenir todas las formas de cáncer. Nuestro optimismo descansa en el hecho de que el cáncer es un desarreglo de las células, que hemos hecho grandes progresos en el conocimiento de las mismas y que, si bien externamente el cáncer parece ser causado por muchas cosas, internamente parece probable que se deba a algún mecanismo de activación relativamente sencillo.

## 9. Investigación

Buena parte de los conocimientos expuestos en este libro los ha descubierto el hombre en un corto período de tiempo, los últimos siglos. Si se pudiera comprimir toda la vida de la Tierra en un año del calendario actual, dicho período de adquisición de conocimientos abarcaría unos pocos segundos de dicho año. ¿Cómo ha sido posible llegar a saber tanto sobre el hombre en tan poco tiempo? Y, ¿cómo se relaciona esto con los demás procesos humanos de búsqueda del conocimiento? En este capítulo se examinarán dichas cuestiones.

### EL PROCESO DE ACUMULACIÓN DE CONOCIMIENTOS

La asombrosa acumulación de conocimientos llevada a cabo por el hombre tiene sus raíces, en primer lugar y de modo principal, en su intrépida y congénita curiosidad, en su insaciable búsqueda de explicaciones. En los primeros tiempos, el hombre, rodeado de misterios por todas partes, se sintió impedido a desvanecerlos por medio del conocimiento, tanto si se encontraba en el hogar como en la guerra o practicando la agricultura, navegando por el mar o explorando la tierra —en cualquiera de las empresas humanas lo desconocido había de ser un compañero inevitable. El premio a una



efectiva acumulación de conocimientos sería la supresión de la incertidumbre, de la duda y del temor, el bienestar que comporta el comprender y el placer de predecir, así como la satisfacción del orden establecido y la adquisición de poder, poder de controlar la naturaleza.

## OBSERVACIÓN

La curiosidad empuja a la acción, una acción en forma de indagación. Se indaga cuando se desmenuzan rocas y se analizan a la llama, o se recorren en trineo centenares de kilómetros por el hielo para llegar a los confines de la Tierra, cuando se avanza montaña arriba o se zambulle en las profundidades, cuando se construye una máquina para volar, o cuando se observa cuidadosamente el aspecto y el comportamiento de miles de moscas de la fruta en busca de conocimientos acerca de la herencia, o cuando se construyen, con cartón y alambre, modelos de la estructura del ADN. Indagar significa observar: mirar, palpar, probar, oler, escuchar, preguntar. Y al poner por escrito lo que se observa se evita que se olvide o se extravíe y de este modo se puede enseñarlo a otros.

## IDEAS

Pero ni la curiosidad ni la acumulación de hechos son suficientes para lograr que lo desconocido pase a ser conocido. Otros animales sienten también curiosidad pero no elaboran conocimiento. La peculiar tendencia del hombre a la búsqueda de explicaciones se asoció con la capacidad de concebir ideas y contrastarlas mediante experimentos. Una idea (o teoría o hipótesis) coloca las observaciones en un orden comprensible, deja entrever vías en que los hechos muestran rela-

ción unos con otros. Una idea procura dar sentido a la que, aparentemente, no lo tiene. Cabe imaginar una situación en que una persona recibe algún tipo de información, que oye, por ejemplo, un noticiero. Su mente intenta rápidamente dar un significado a los hechos, conferirles un sentido en un marco mayor buscando relaciones de causalidad entre ellos, y si, por ejemplo, varios acontecimientos han ocurrido en un corto período de tiempo quizá intentará adscribirlos a una única causa común. La mente repudia la coincidencia, insiste en ver una causalidad, en preguntar los porqués.

Las ideas se relacionan de manera muy compleja en la notable facultad mental del hombre que es la imaginación. La imaginación le permite establecer la descripción de las relaciones posibles. Una vez formulada dicha descripción se tiene una explicación teórica de lo que se ha observado, una idea sin verificar.

## VERIFICACIÓN DE LAS IDEAS

Y, sin embargo, una idea por sí sola, por buena que sea, es tan sólo algo que se ha pensado. Es una creación del intelecto, del mismo modo que la tierra produce una flor o una hierba, o como el humo es el producto del fuego. No es necesariamente cierta; puede decirse, en este sentido, que empieza su vida de forma débil: una idea se debe robustecer y templar por medio de la comprobación experimental. Para que una idea se corresponda con la verdad debe verificarse si es plenamente congruente con la naturaleza. La mejor manera de confirmar si una idea es congruente con los hechos naturales consiste en tratar de buscar si permite predecir algo. No por casualidad sino de manera coherente. Si una idea señala que determinados extremos están relacionados de forma causal, el que una ocurra significará que va a suceder algo previsible. Si



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

ello no ocurre, querrá decir que la idea es defectuosa; una idea defectuosa o equivocada no comporta, necesariamente, que sea una mala idea, ya que puede conducir a una serie de experimentos que si bien prueben que la idea era equivocada permitan avanzar un poco más en el conocimiento. Los experimentos con tomates descritos en el capítulo anterior, aunque partían de una idea equivocada revelaban la extraordinaria capacidad del berilio para sustituir parcialmente al magnesio durante el desarrollo de la tomatera.

Cuando se estropea el motor del coche, el conductor, después de investigar bajo el capó, formula la idea de que el fallo se debe a un defecto de la bomba de gasolina, y predice que si la sustituye el motor funcionará. Si su predicción es correcta, su idea se convierte en digna de tener en consideración ya que es la manifestación de algo cierto. Dicha idea podría adquirir aún más entidad si le permitiera generalizar a partir de este caso concreto de este modo: cualquier avería del coche con determinados síntomas exige la sustitución de la bomba de la gasolina.

La manera de contrastar una idea es realizando un experimento. Una idea es buena en la medida en que lo es el experimento ideado para verificarla. Los buenos experimentos pueden ser sencillos, como en el caso de la sustitución de la bomba de gasolina del coche, o bien requerir mucha imaginación o ingenio. Tiene suma importancia la elección de un sistema o modelo adecuado. Por ejemplo, las observaciones acerca de la herencia en el hombre generan muchas ideas para explicarla, pero pocas se pueden verificar directamente. El sistema o modelo debería ser, en este caso, más simple que el hombre, más manipulable que el hombre y con una duración de las generaciones de unas pocas horas en lugar de los treinta años de la especie humana. Por esto, los fundamentos de los conocimientos de la genética humana proceden de los guisantes, las moscas de la fruta, las levaduras y las bacterias.

## REPETIR LOS EXPERIMENTOS

Un experimento que confirma satisfactoriamente una predicción paga con creces los desvelos y trabajos del investigador. Pero eso no acaba ahí. Los científicos deben repetir, de distintas maneras, sus experimentos para poder estar seguros de que no hay posibilidad de error; preguntan a sus colegas y comentan con ellos para encontrar los fallos de sus ideas y experimentos, asisten a congresos científicos y presentan sus hallazgos a audiencias compuestas por colegas, de afinado sentido crítico. Y, finalmente, publicarán su trabajo con suficiente lujo de detalles para que la comunidad científica internacional pueda aprender de él y repetir el trabajo. La mayoría de los descubrimientos científicos sólo se aceptan como verdaderos después de que varios científicos hayan confirmado los experimentos. Sólo entonces se puede estar seguros de que aquellas ideas conducen a observaciones ciertas.

Nada de esto es fácil; una verdad importante que los científicos aprenden es cuán extremadamente difícil resulta probar de manera concluyente que algo es cierto.

## ESTAR PREVENIDO ANTE LO INESPERADO

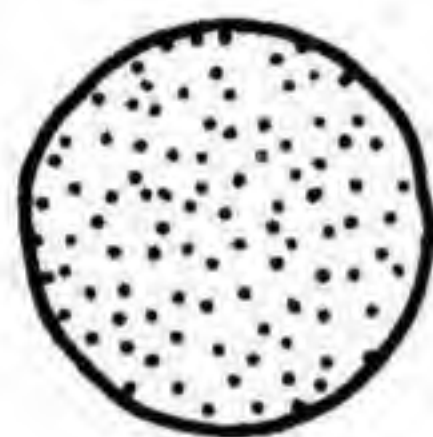
Cabe suponer que se estará de acuerdo en que el proceso descrito es completamente lógico, pero hay que añadir que las cosas inesperadas suceden con una frecuencia desconcertante. Ocurren lo suficientemente a menudo como para que otro atributo esencial de la acumulación de conocimientos sea el estar prevenido ante las sorpresas. Los hechos inesperados pueden achacarse a error en el planteamiento de los experimentos, a que la idea original sea errónea o bien pueden tener alguna explicación trivial. En la ciencia, sin embargo, siempre cabe la sorpresa, por la naturaleza misma de su mi-



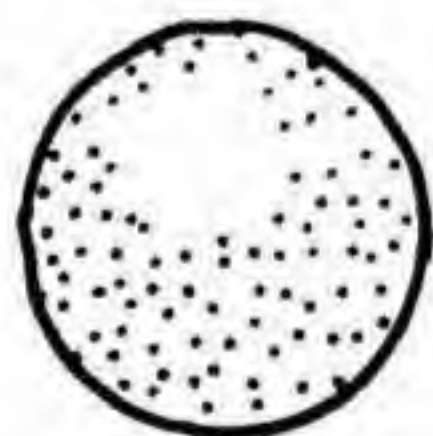
sión. El sujeto de la ciencia es, después de todo, lo desconocido.

## EL CUENTO DEL DESCUBRIMIENTO

Un investigador está cultivando bacterias patógenas en una especie de gelatina dispuesta en cápsulas de vidrio. Una mañana, al entrar en el laboratorio, advierte que una de las cápsulas tiene un aspecto extraño. Todas las cápsulas deberían ser así:

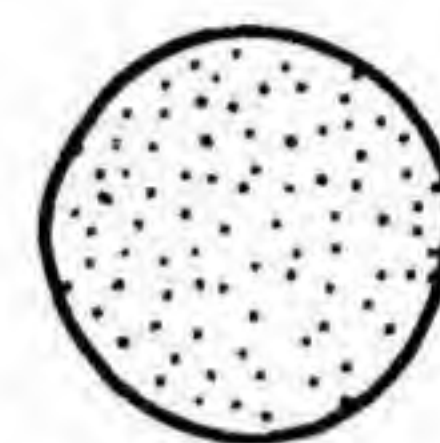


donde cada punto es una colonia de bacterias desarrollada a partir de una célula única. Sin embargo, una de las cápsulas presenta este aspecto:

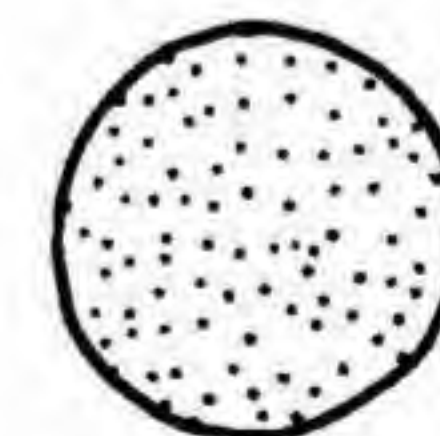


Hay una extensa zona clara donde no crecen bacterias. Su primer impulso es eliminar la cápsula molesta, pero entonces esta observación inesperada e irritante le hace reflexionar. Sabe que las bacterias no rechazan sin motivo ninguna zona de la cápsula. Parece, por tanto, que algo impide el crecimiento de las bacterias en aquella zona clara. ¿Es posible que

algún veneno cayera en el interior de la cápsula cuando la destapó ayer? El investigador advierte que han abierto la ventana y hay mucho polvo en la habitación. Algún veneno transportado por una mota de polvo pudo difundirse en todas direcciones y formar aquella zona sin crecimiento. Entonces decide comprobarlo con muestras de polvo procedentes de toda la habitación y preparando nuevas cápsulas de bacterias donde coloca en el centro unas motas de dicho polvo. Dos días después las bacterias se han desarrollado bien.



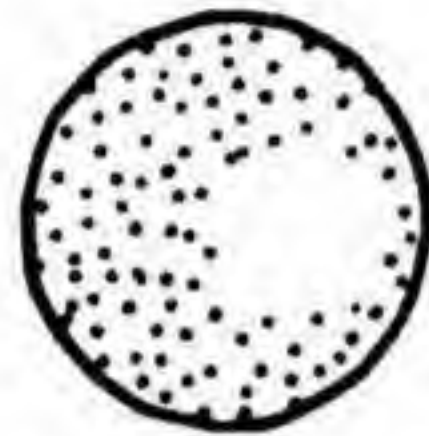
¡A empezar de nuevo! De repente, el investigador se acuerda que en el fondo de su cajón hay un viejo emparedado de mantequilla de cacahuete totalmente enmohecido. Excitado, barrunta que quizá algo del emparedado pudo llegar a la cápsula y envenenar las bacterias. Toma una muestra pequeña de la mantequilla de cacahuete y del pan y realiza la prueba igual que hizo anteriormente con el polvo. Dos días después la placa tenía este aspecto:



Disgustado, arroja las cápsulas y el emparedado en el cubo de la basura y decide lavarse las manos para quitarse los res-



tos de tales porquerías. Al hacerlo, observa que en su mano hay una mancha verdeazulada que parece provenir del emparedado de mantequilla de cacahuete. Ahora siente un escalofrío en la columna vertebral y una nueva idea se le aparece con toda su fuerza. ¿Ha podido penetrar en la cápsula el moho del pan? Rápidamente toma un fragmento pequeño enmohecido del emparedado y lo coloca sobre más bacterias en una cápsula. Las siguientes cuarenta y ocho horas transcurren lentamente para el investigador, ya que tiene el presentimiento de que sucederá algo. Y, en efecto, ocurre.



El moho impide que a su alrededor se desarrollen las bacterias patógenas.

Esta breve narración ficticia ilustra algunas de las características del descubrimiento científico. Termina aquí porque la historia verídica ya tuvo el mejor final posible. Si bien, que el autor sepa, sir Alexander Fleming no gustaba de los emparedados de mantequilla de cacahuete, descubrió, en 1929, la penicilina de una manera parecida a la contada.

## OTRA VEZ LOS FAMOSOS EXPERIMENTOS DE AVERY

Hay que retornar a los experimentos de Avery, con los cuales probó que el ADN es la base material de la herencia. Para ello utilizó un modelo (capítulo 2): las bacterias causantes de la neumonía. Observó que una mezcla de moléculas li-

beradas por las bacterias productoras de la neumonía muertas eran capaces de transformar las bacterias benignas en causantes de dicha enfermedad. Sustentaba la idea de que las moléculas del ADN responsables eran las de la mezcla. En el primer experimento que ideó exponía la mezcla de moléculas producidas por las bacterias muertas a un enzima que rompe el ADN. Si el principio activo era el ADN, era posible predecir que el tratamiento enzimático destruiría la capacidad material de transformar las bacterias benignas en patógenas. Esto fue exactamente lo que sucedió. De modo que aquel sencillo experimento confirmaba la predicción y se abría paso una nueva verdad, destinada a tener gran influencia en la investigación posterior. En este momento, aunque quedaba mucho por hacer para remachar la prueba, ya no se podía dudar de que el ADN es la base material de la herencia.

## LOS LÍMITES DE LA CIENCIA

Las ideas son a menudo predicciones que sugieren experimentos con que comprobarlas. Cuando es posible predecir de modo regular cómo y de qué manera se van a producir determinados acontecimientos, las ideas en que se basan dichas predicciones se aceptan de forma general como ciertas y entonces se denominan leyes o principios de la naturaleza. Son las verdades consideradas en este libro. Por el contrario, hay cierta tendencia en la vida cotidiana, en la sociología o la psicología y también en la filosofía, el arte y la religión, a llamar «buenas» ideas a las que se consideran inspiradas, brillantes o ingeniosas, aunque no son necesariamente buenas según los criterios de la ciencia. En la mayor parte de los casos, tales ideas son formuladas como respuestas a fenómenos demasiado complicados para comprobarlos mediante experimentos. Las predicciones efectuadas a partir de ideas de este tipo ra-



ramente conducen a lo que se espera de ellas, salvo por casualidad.

Cuando se dice que un gran maestro de la pintura ha plasmado la verdad en sus pinturas, que la psicología o la psiquiatría han desvelado verdades de la conducta humana o que los teólogos han descubierto la certeza de la existencia de Dios, se emplea la palabra «verdad» de un modo distinto del que se utiliza en la ciencia. Ninguno de los criterios examinados se aplica en estas condiciones. Cabría afirmar, para precisar aún más, que muchas personas tienen la sensación intuitiva de que la verdad ha sido revelada, aunque muchas otras personas continúan sin estar convencidas de ello. La aceptación universal de tales verdades no es posible.

En el complejo y misterioso mundo de los valores y la conducta humana las ideas son moneda corriente. Todas las personas las generan libremente para intentar dar sentido al embarullado mundo del pensamiento y de la acción humana que contemplan. Las ideas aparecen en tal profusión debido, en parte, a que son incontrovertibles, improbables. Pueden atraer a algunos porque no se puede demostrar que sean falsas, mientras que pueden repeler a otros porque no es posible probar que sean ciertas. La gran dificultad en el decurso de la historia —en todos los campos del pensamiento y la experimentación humanos— ha sido producir ideas que se pudieran comprobar.

El dilema humano se basa, en parte, en que las acciones personales o sociales deben, a menudo, aceptarse con el débil apoyo de ideas no comprobadas ni comprobables. Las personas y los gobiernos tienen que tomar decisiones respecto a materias de las cuales se sabe muy poco. En la medida de lo posible, el que las decisiones políticas puedan llegar a ser racionales, es decir, teniendo en cuenta los conocimientos disponibles, constituye una regla de sabiduría. Puede decirse que el racionalismo es la aplicación de los principios y métodos de

la ciencia a problemas mayores que aquellos que habitualmente la ciencia trata de resolver.

Eso no significa que la ciencia sea más íntegra que los más complejos ámbitos de la conducta humana. La ciencia, simplemente, formula preguntas más simples: ciñe deliberadamente su búsqueda a proponer preguntas sencillas, que llevan a respuestas claras y limitadas. Muchas preguntas sencillas generan muchas respuestas sencillas, revalidables por todos los escépticos que quieran tomarse la molestia de repetir la experimentación. O sea, la ciencia establece sus propios límites: las verdades que propone deben ser verificables por la experimentación o no vale la pena proclamarlas. Ha sido enorme la repercusión a largo plazo de esta manera de obtener verdades en las vidas humanas, porque se trata de un procedimiento acumulativo y duradero.

## ENFERMEDADES MENTALES Y QUÍMICA DEL CEREBRO

Desde siempre, el hombre se ha sentido fascinado por el funcionamiento de la mente. En particular, las enfermedades mentales siempre nos han atemorizado e intrigado, y hemos tratado de encontrarles explicación. Algunas ideas pretéritas atribuían dichas enfermedades a dioses, diablos o a complejas interacciones familiares y sociales. Como ya se ha puesto de manifiesto, estas explicaciones raramente se pueden comprobar mediante experimentos debido a que la mayoría de los aspectos concernientes a la conciencia humana son demasiado complejos para poder estudiarlos con los métodos científicos actuales. A pesar de ello, muchas de tales ideas son ampliamente aceptadas, erróneamente, como ciertas y como básicas del tratamiento psiquiátrico.

La historia de la relación del hombre con las enfermedades mentales ha tenido algunos contrasentidos y algunos gi-



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

ros imprevistos. Ilustra lo indicado anteriormente acerca de lo inesperado. A medida que el hombre ha luchado durante años, con poco éxito, para tratar de comprender y paliar las enfermedades mentales mediante diversas formas de psicoterapia, se ha ido acumulando un creciente número de pruebas científicas que mostraban que los fármacos alteraban radicalmente la conducta humana. En concordancia con todas las demás pruebas de que los procesos vitales son de naturaleza química, un número cada vez mayor de productos químicos naturales y sintéticos están produciendo sensibles mejoras de los síntomas de muchas enfermedades mentales. Incluso el difundido abuso de fármacos en nuestra sociedad apoya la naturaleza química de los procesos mentales.

Hace unos veinte años se descubrió que una simple sal, el carbonato de litio, cuando se ingiere regularmente por vía oral previene la aparición de los síntomas de la psicosis maniaco-depresiva. La administración de litio para tratar este tipo de psicosis fue empírica y no se realizó a partir del conocimiento de la química cerebral. Es interesante notar, sin embargo, que el litio es muy parecido al sodio y que este elemento, como saben los científicos desde hace tiempo, es esencial para la función cerebral. Por ahora, se desconoce todavía el modo de acción del litio.

Todos estos descubrimientos fortuitos acerca de los efectos de los fármacos han abierto el campo de la conducta humana al estudio mediante el método científico. El resultado ha sido una mejora radical de muchas enfermedades mentales y cabe esperar que continúe dicho progreso.

## INVESTIGACIÓN BÁSICA E INVESTIGACIÓN APLICADA

En este libro se ha utilizado las palabras «ciencia» e «investigación» para referirse a la investigación básica, o indaga-

ción de nuevos conocimientos. Hay, sin embargo, un dominio mucho más amplio de la investigación, la investigación aplicada o tecnología, relacionada con la aplicación, para satisfacer las necesidades humanas, de los conocimientos adquiridos en la investigación básica.

La investigación básica y la investigación aplicada difieren bastante. En la investigación aplicada, al disponer de los conocimientos básicos, se pueden establecer objetivos de producción específicos, es posible asignar tareas definidas a los equipos de investigación, facilita a los directores evaluar fácilmente los resultados, permite establecer contratos y, desde un punto de vista comercial, puede arriesgarse capital en la empresa. Es el caso, por ejemplo, de la planificación y ejecución de los viajes a la Luna y a Marte o de la producción industrial de vacunas contra la poliomielitis para inmunizar a la población.

La investigación básica, por el contrario, es la indagación de lo desconocido. No hay guías, el investigador está solo con su ingenio, su imaginación y su curiosidad. Los hechos inesperados son norma y el investigador debe estar preparado para aprovecharlos. Puede no haber horarios. Los resultados sólo es posible evaluarlos al cabo de varios años durante los cuales el científico debe poder desarrollar libremente planes e hipótesis.

Quienes se dedican a la investigación aplicada deben utilizar su inventiva para obtener objetivos específicos a partir de principios conocidos. Quienes se consagran a la investigación básica deben descubrir los principios.

Huelga decir que la tecnología sería un gigante con los pies de barro, un globo deshinchado, si no existiera un incesante avance procedente de nuevos conocimientos. La medicina actual sirve de ejemplo para comprender la naturaleza del problema. La investigación básica ha hecho posible una notable serie de avances fundamentales en la erradicación y



tratamiento de muchas enfermedades. Pero las enfermedades que continúan acosando al hombre representan vastos dominios de lo desconocido. Ninguna idea nueva permite, por el momento, afrontar el azote del cáncer, las enfermedades cardíacas, las genéticas y otras. No obstante, la investigación aplicada, pública y privada, produce una plétora de máquinas, cada vez más costosas, que inevitablemente benefician a muy pocos pacientes y rápidamente incrementan los costes, que soporta toda la población. Así, la tecnología para el tratamiento del cáncer, las máquinas para diálisis de enfermos del riñón, los corazones artificiales y una variedad de otras ingeniosas aplicaciones de principios conocidos constituyen costosos parches, que revelan con dramatismo las deficiencias de los conocimientos actuales acerca de esas enfermedades.

En la actualidad, el coste de la medicina y la salud pública para los estadounidenses asciende a más de 200 mil millones de dólares anuales, y sigue aumentando rápidamente de año en año; esta espeluznante factura es el precio que pagan por un exceso de investigación aplicada sobre la investigación básica (así como también por otros motivos, tales como mala planificación, ineptitud y codicia). En vista de ello cabría esperar que los Estados Unidos invirtieran en investigación básica, para de esta manera poder prevenir y curar la enfermedad. Pero no ocurre así. Alrededor del medio por ciento del importe de los gastos de la salud pública estadounidense va a parar a la investigación básica y sus brillantes investigadores se ahogan lentamente en la falta de asignaciones.

## APOYO A LA CIENCIA

De todos modos, la limitada ayuda que se otorga a la investigación médica fundamental es administrada, satisfactoriamente por el gobierno de los EE.UU. Los profesores pro-

porcionan salarios a los estudiantes más prometedores, tanto antes de obtener su graduación como durante los años inmediatamente posteriores. Ello permite al estudiante trabajar en un laboratorio bajo la tutoría de un preceptor.

Entonces, el estudiante puede optar a una beca que le permita actuar como investigador independiente en una universidad o instituto de investigación. La concesión de una beca representa la consolidación definitiva para el joven científico que necesita probar sus ideas, sus experimentos y afirmarse en su creencia de que su trabajo es importante para la humanidad. Supone un paso decisivo para un científico, ya que encarrila su futuro y descubre toda su imaginación y pericia para la tarea.

Un grupo de científicos, que sirven al gobierno como consultores, revisa cuidadosamente las solicitudes y les asigna un orden de preferencia de acuerdo con su mérito científico. Las becas se conceden mientras no se agoten los fondos autorizados por el Congreso. Concedida la beca, el investigador goza de considerable autonomía para la realización de su trabajo y publicación de los resultados.

Este sistema de apoyo a la investigación básica supera a cuantos se hayan podido planear. Asegura la selección de los proyectos más prometedores, espolea la independencia y la originalidad, otorga un premio máximo a la propia motivación y a la originalidad, responsabiliza a los científicos, al tiempo que les permite un razonable grado de flexibilidad en la búsqueda de lo desconocido, algo esencial en cualquier empresa de indagación.

## LA UTILIZACIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS

Los conocimientos científicos son moralmente neutros. Los secretos de la naturaleza están ahí y los hombres y muje-



res se aplican a su búsqueda. Pero la manera como la sociedad utiliza esos conocimientos raramente es neutra desde el punto de vista de la moral, ya que poseer conocimientos significa poder y el deseo de poder, bueno o malo, ha espoleado a la humanidad desde sus comienzos.

Sólo en el campo de la salud, el ansia de conocimientos ha permitido un espectacular aumento de las expectativas de vida; la oportunidad para las mujeres de controlar sus embarazos, la práctica erradicación de enfermedades como la peste, el cólera, la tuberculosis, la poliomielitis, la difteria; las vitaminas y una mejora general de la alimentación; los rayos X en el diagnóstico y tratamiento médicos; grandes avances en la tecnología quirúrgica y en anestesiología; avances en la prevención o tratamiento de numerosas alteraciones de origen inmunológico, neurológico, hormonal o genético. Ciertamente, un monumental logro de la ciencia médica. Y debido a los recientes avances de la investigación básica, en especial los importantes descubrimientos descritos en este libro, hay también razones para ser optimistas respecto a las posibilidades del hombre para erradicar o tratar con mayor eficacia otras causas principales de aflicción, como el cáncer, las enfermedades genéticas o las cardiovasculares (si la respectiva política nacional no lo impide).

La otra cara de la moneda es que el hombre amenaza las reservas mundiales de ADN con las radiaciones procedentes de la proliferación de ingenios nucleares; envenena y contamina el agua, los alimentos y el aire con el alarmante aumento de productos químicos industriales; destruye la capa de ozono que protege a todas las criaturas del poder mortífero de las radiaciones solares; engendra más hijos de los que la Tierra puede alimentar, aunque los métodos de control de la natalidad están disponibles para todos. Parece como si mantuviéramos un pugilato con nosotros mismos para ver si alcanzamos la felicidad total o la postrera agonía.

## ¿SE DEBERÍA CONTROLAR LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA?

La ciencia es, simplemente, la iluminación del misterio; la clarificación de algo que ya se encuentra en la naturaleza. Pero la adquisición de conocimientos proporciona poder, que puede utilizarse para el bien o para el mal, de acuerdo con los valores sociales. Si se desea impedir la utilización perversa y favorecer el empleo provechoso de la ciencia nuestra opinión es que debemos buscar la solución en los valores de la sociedad. Pero otros sugieren que hay un modo más fácil de hacerlo: suprimir la ciencia. Hay una manera rápida de conseguirlo: la retirada de fondos, puesto que la investigación actual es muy cara de realizar. Pero inténtese recortar los fondos para la investigación biomédica y obsérvese el resultado. Los hombres no cejarán en su empeño de conocer las enfermedades que les afligen; si se suprime la búsqueda de conocimientos no hay otra opción que la investigación aplicada, que, ciertamente, es más segura pero mucho más cara. Por ejemplo, si se hubiera impedido proseguir la investigación básica acerca de la vacuna contra la poliomielitis, se debería haber continuado en la búsqueda de nuevos y mejores tratamientos de las víctimas de dicha enfermedad. El resultado de tal abandono de la investigación de nuevos conocimientos y tal confianza forzada en los conocimientos actuales es totalmente predecible: la medicina se estancaría por completo al quedar reducida a una especie de ortopedia, continuarían creciendo los costes y no disminuiría la insalubridad.

Ahora se está, como nunca antes en la historia, en la cúspide de la aplicación del progreso de los últimos cuarenta y cinco años en los problemas de la salud humana. Es inmenso el potencial ante un mejor y más rápido avance en el camino de aliviar los sufrimientos humanos.



## BENEFICIOS Y RIESGOS QUE COMPORTA LA INVESTIGACIÓN MÉDICA

¿Pero qué sucede cuando son los propios científicos quienes solicitan el control de la investigación científica? Recientemente ha llamado mucho la atención un ejemplo de esto: la investigación acerca del ADN recombinante (capítulo 5). Se trata de la posibilidad de engarzar fragmentos de ADN de una planta o de un animal al ADN de una bacteria, y después, al multiplicarse la bacteria, producir muchas copias del ADN añadido. La bacteria sirve únicamente de factoría elaboradora de lotes de copias de los fragmentos de ADN añadido. Los biólogos consideran esta técnica como una de las más valiosas de cuantas hayan podido imaginarse para ampliar los conocimientos actuales sobre los genes, su estructura y su manera de activarse y desactivarse. Considerados los complejos problemas de la embriogénesis y del cáncer en los dos capítulos precedentes, cabe confiar en que el lector vislumbre el gran valor de esta técnica para estudiar el gran problema de la expresión de los genes.

Pero parece que algo desentona. Algunos científicos alzan su voz para poner de relieve el riesgo de tales experimentos. ¿Pueden los genes añadidos alterar las bacterias transformándolas en seres peligrosos para el hombre? ¿Pueden esos experimentos alterar la evolución y crear nuevas, y potencialmente peligrosas, formas de vida?

Es cierta la posibilidad teórica de crear alguna bacteria más peligrosa al añadirle nuevos ADN. Tal como se ha expuesto en este libro, las células pueden cambiar como consecuencia del ADN añadido. El que las bacterias nunca se hayan vuelto más peligrosas por adición de ADN no quiere decir que esto no pueda ocurrir. Por esa razón, los científicos, por propia iniciativa, han acordado no reproducir genes de virus cancerígenos ni genes de bacterias patógenas en otras

bacterias por medio de las técnicas del ADN recombinante. Además, se realizan con sumo cuidado otros tipos de experimentos que conllevan la multiplicación en las bacterias de genes humanos o de animales estrechamente emparentados con el hombre.

Cuando se acuerda tomar precauciones se supone que hay un riesgo real, esto es, uno que se puede prever basándose en lo que ha ocurrido anteriormente. Cree el autor, sin embargo, que en el caso del ADN recombinante las precauciones se han tomado contra riesgos hipotéticos, riesgos de algo sólo imaginado. ¿Puede ayudar lo expuesto en estas páginas a evaluar el riesgo de la hipotética producción de nuevos organismos que entrañen un peligro? Por su parte, el autor se siente tranquilo al afirmar que según la esencia de lo expuesto, si bien todo es posible, tal posibilidad es extremadamente improbable. Un cambio en el ADN de un organismo casi siempre le resulta perjudicial, esto es, reduce sus posibilidades de supervivencia. Haciendo un símil, cabría decir que, la adición al azar de frases a los escritos de Shakespeare es muy improbable que los mejorara. Dicha observación no contradice el que la evolución de un organismo requiera cambios en el ADN; es decir, la alteración del, o la adición al, ADN para producir mejoras. Sin embargo, estas cosas suceden raramente (capítulo 5). El principio de que los cambios habidos en el ADN son perjudiciales porque reducen las posibilidades de supervivencia es válido tanto si estos cambios los produce una mutación como si los provoca la introducción deliberada de genes extraños. Es decir, al añadir ADN extraño más que hacer que un organismo se torne más virulento (peligroso) probablemente sucederá a la inversa: el organismo se volverá, casi siempre, más débil.

Los beneficios en comparación con los riesgos que conlleva la investigación del ADN recombinante —indagación de lo desconocido con una inmensa capacidad de ampliar los cono-



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

cimientos del hombre respecto a los peligros que le acechan—es sólo uno entre los muchísimos casos semejantes de pruebas que debe afrontar en la compleja sociedad actual.

Desde los albores de su conciencia el hombre ha debido afrontar dificultades de este tipo: escoger entre beneficio y riesgo. El cazador primitivo tenía que optar entre el beneficio de matar su víctima y así obtener alimento, y la posibilidad de morir en el empeño. Actualmente, en la vida privada del hombre y en las decisiones políticas tales elecciones resultan mucho más complicadas. Los beneficios son, por lo general, mucho más dudosos que los propios de la investigación del ADN recombinante, mientras que los riesgos acostumbran ser reales, no imaginarios. Por ejemplo:

1. La desmedida producción industrial de artículos de consumo no tiene en cuenta la correspondiente contaminación del agua, el aire, los alimentos e incluso de la capa de ozono.

2. La producción industrial de «medicamentos» y otros compuestos químicos —que se supone que contribuyen al bienestar— no para mientes en los riesgos inherentes al consumo de sustancias indebidamente comprobadas y a menudo inútiles.

3. La producción de vacunas como, por ejemplo, la de la poliomielitis, implica un riesgo de efectos adversos en sus futuros receptores. En cualquier caso, no se puede controlar la inocuidad de ningún fármaco o vacuna, durante treinta años antes de lanzarla al mercado. Y, sin embargo, se sabe que algunos de los más graves efectos adversos de los medicamentos sólo pueden producirse después de un largo período de latencia.

4. El desarrollo de la energía nuclear conlleva el riesgo de las radiaciones para el ADN del hombre.

5. El apoyo estatal a la industria del tabaco sin tener en cuenta la certeza de que sus productos matan de cáncer y producen otras enfermedades.

Se trata, como bien se sabe, de unas pocas muestras de disyuntivas de carácter social y cualquiera puede encontrar muchos otros ejemplos en su propia vida. Pero, por lo general, muy poco se puede hacer que no conlleve riesgo alguno.

Para cualquier ciudadano, la mejor elección en el dilema entre beneficios y riesgos es posible cuando dispone de buena información para tomar la decisión. Un buen ejemplo de ello es lo sucedido en Cambridge (Massachusetts), en 1977, en relación, precisamente, con la investigación del ADN recombinante. El Ayuntamiento alarmado por las graves afirmaciones acerca de los peligros de la investigación del ADN recombinante planeada por la Universidad de Harvard, pidió a un comité de ciudadanos una opinión experta, un estudio del problema y consejo acerca de las acciones que debía emprender. El comité, compuesto enteramente por legos en la materia, actuó con diligencia y responsabilidad y aconsejó que siguiera la investigación observando algunas medidas razonables de precaución junto a las exigidas por el National Institute of Health (Instituto Nacional de la Salud). El Ayuntamiento aceptó las recomendaciones y el comité mereció la admiración tanto de los ciudadanos como de los científicos. Este feliz desenlace apoya la idea del autor de que los profanos en la materia pueden entender las cuestiones científicas importantes y tomar decisiones responsables respecto a ellas.

## EL FUTURO

El hombre ha creado los términos de su evolución futura. A diferencia de las otras especies vivientes, tiene capacidad para modificar profundamente su ambiente, demasiado a menudo en su propio detrimento. Su destino está ahora determinado más por lo que se disponga realizar con el mundo que por lo que el ambiente natural pueda influir sobre él. Este fe-



## LAS RAÍCES DE LA VIDA

nómeno se llama evolución cultural. Se trata de un juego completamente nuevo. El hombre puede alterar su pensamiento con fármacos, envenenar el aire, el agua y los alimentos, dañar sus genes por medio de las radiaciones nucleares o por las radiaciones ultravioleta, que penetran a través de la capa de ozono que está destruyendo, puede eliminar para siempre de la faz de la Tierra cualquier variedad de otras especies animales y tiene la posibilidad de agotar sus reservas de energía para producir artículos que realmente no necesita. También puede prolongar la vida, erradicar las enfermedades, aliviar la pobreza, buscar la comodidad y la satisfacción.

¡El aire puede estar repleto de veneno pero también lleno de música!

El hombre posee, ciertamente, una casi infinita capacidad tanto de crear belleza y alegría como de cometer monumentales desatinos. El futuro vela la respuesta a la pregunta de si el hombre será capaz de ver claro y hacer el bien a todas las criaturas de la evolución. Pero de un extremo se puede estar seguro: la sociedad que ahoga el libre ejercicio de su curiosidad tiene muy poco que ofrecer al futuro. La búsqueda de explicaciones es una tendencia tan básica como el hombre o el sexo. Hay que continuar la investigación, y en la propia investigación se encontrará la recompensa.

Los conocimientos son como una gran biblioteca: el hombre tiene a su disposición todos los conocimientos alcanzados durante todos los tiempos y continúan almacenándose nuevos volúmenes en estantes. Entre las tapas de los libros figura todo aquello que se sabe a ciencia cierta del mundo. Constituye la base para levantar el arsenal de conocimientos del futuro. Cabría desear tener más volúmenes que le ayudaran a comprender y, por tanto, a controlar, por ejemplo, la codicia humana o a adquirir el amor y la sabiduría pero aún no se han escrito. Estos volúmenes todavía no escritos no quitan mérito a los ya existentes.

Hay quien afirma que el conocimiento alcanzado por la ciencia «deshumaniza» la vida porque arroja sobre lo desconocido, sobre el misterio, una luz plana y desapasionada. El autor no lo cree así. Al conocer lo que la ciencia ha revelado, el hombre no puede menos que aumentar su sentido de admiración por la increíble belleza e «ingeniosidad» de su construcción. ¿Pierde o gana por ser capaz de ver debajo de su piel y contemplar el diligente tráfico entre el ADN, el ARN y las proteínas? Cabe esperar que el lector sienta que ha ganado. Y para quien no encuentra satisfacción alguna en el tráfico de las moléculas o para aquel que necesita el misterio de la naturaleza inexplorada para alimentar sus «creencias» personales hay que decir que pueden estar tranquilos, que la ciencia sólo ha rodeado ligeramente la superficie de lo desconocido. Los conocimientos que todavía quedan por descubrir exceden mucho a los descubiertos de aquella manera. Existe el mismo espacio que antes para la admiración, la belleza, la inspiración, la ensoñación, la magia, el misterio y los dioses particulares.



# Glosario

## CAPÍTULO 1

**Átomos:** Las entidades más pequeñas de que está formada la materia viviente. Hay alrededor de un centenar de átomos distintos, pero los cinco principales son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo.

**Moléculas:** Conjuntos de átomos enlazados químicamente. Su tamaño es, por término medio, unas diez veces mayor que el de los átomos.

**Nucleótidos:** Moléculas que constituyen los eslabones de las cadenas de ADN y de ARN. En el ADN hay cuatro tipos: ácido adenílico, ácido guanílico, ácido citidílico y ácido timidílico. En el ARN es casi igual excepto el ácido timidílico, sustituido en éste por el ácido uridílico.

**Aminoácidos:** Moléculas que constituyen los eslabones de las cadenas proteínicas. Hay veinte clases distintas. Suelen designarse con las tres primeras letras de su nombre en inglés.

**Entropía:** Término químico que designa el estado de desorden en un sistema.



**Energía:** Término químico que designa la capacidad de un sistema para realizar un trabajo.

## CAPÍTULO 2

**Gen:** Fragmento de información que instruye a la maquinaria celular para elaborar determinada proteína. Los grupos de genes contienen las instrucciones para formar grupos de proteínas que determinan rasgos hereditarios.

**Genética:** La ciencia de la herencia.

**ADN:** Cadena larga de nucleótidos. Es la forma química de los datos biológicos y la sustancia de los genes.

**Proteínas:** Cadenas de aminoácidos dispuestos según un orden específico. La mayor parte de las estructuras y funciones son proteínas.

**ARN:** Cadena de nucleótidos semejante al ADN.

**ARN mensajero (ARNm)** Copia en ARN de un gen o fragmento de ADN.

**Ribosoma:** Combinación de ARN y proteína que, con la ayuda del ARN de transferencia y el aporte de aminoácidos, «lee» el ARN mensajero y enlaza los aminoácidos en el orden correcto formando proteínas.

**ARN de transferencia (ARNt)** Moléculas pequeñas de ARN a las que se unen los aminoácidos antes de ser llevados al ribosoma para ser engarzados en la cadena de proteína.

**Bacteria:** Forma unicelular de vida, mucho más simple y pequeña que la célula animal. A menudo son capaces de vivir sin otros recursos que sales minerales y un hidrato de carbono como fuente de energía.

**Virus:** Combinación de ADN (en algunos casos ARN) y proteínas que únicamente pueden reproducirse en el interior de una célula viva.

## CAPÍTULO 3

**Ozono:** Molécula formada por tres átomos de oxígeno. Se ha acumulado en la parte superior de la atmósfera donde forma una pantalla protectora contra la radiación ultravioleta.

**Enzima:** Molécula de proteína que puede desempeñar una tarea química específica. Actuando como catalizadores, los enzimas consiguen que las reacciones se desarrollen más rápidamente.

**Membrana:** Combinación de grasa y proteína que envuelve el contenido celular y lo protege del ambiente exterior.

## CAPÍTULO 4

**Clorofila:** Moléculas verdes de las plantas. Captan la energía lumínica.

**Cloroplastos:** Compartimentos interiores de las células vegetales donde se transforma en ATP la energía lumínica captada.



**Mitocondrias:** Compartimentos interiores de las células donde se queman las moléculas de hidrato de carbono para producir ATP.

**ATP:** Tritosfato de adenosina. La forma de energía química más comúnmente utilizada por las células; hace posible el trabajo celular.

**AMP:** Monofosfato de adenosina; es decir, el ATP sin el pirofosfato.

**PP:** Pirofosfato, o lo que es lo mismo, dos fosfatos enlazados. El PP y el AMP originan el ATP.

**Combustión:** Combinación de una molécula, como, por ejemplo, un hidrato de carbono, con oxígeno para liberar energía (calor o trabajo)

**Electrón:** Parte de un átomo cargada negativamente.

## CAPÍTULO 5

**Evolución:** Proceso por el cual las formas actuales de vida se han desarrollado a partir de las más antiguas.

**Mutación:** Alteración de la estructura del ADN por algún agente físico o químico. Un mutágeno es un agente que puede causar mutaciones; la mutagénesis, la producción de mutaciones.

**Plásmido:** Fragmento pequeño y circular de ADN de una bacteria que puede entrar y salir de la célula bacteriana.

**ADN recombinante:** Dos cadenas de ADN, engarzadas longitudinalmente, procedentes de fuentes diversas. Más específicamente, fragmento de ADN aplicado a un plásmido bacteriano.

## CAPÍTULO 6

**Selección:** Proceso por el cual el ambiente favorece o impide determinada variante particular de un organismo.

## CAPÍTULO 7

**Embrión:** Organismo en las primeras etapas de su desarrollo.

**Expresión de los genes:** Expresión de un gen en proteína.

**Represión:** Inhibición de un gen de modo que no se puede traducir en proteína.

**Represor:** Molécula de proteína que impide expresar un gen.

**Bacteriófago:** Virus que utiliza bacterias para fabricar más copias de sí mismo.

**Regeneración:** Restauración de un órgano amputado.

**Clon:** Grupo de células derivado de una sola.

## CAPÍTULO 8

**Cancerígeno:** Que produce cáncer.



**Virus cancerígeno:** Virus capaz de convertir una célula normal en cancerosa.

**Teratoma:** Tipo especial de cáncer que produce tejidos diferenciados como pelo, huesos, etc.

**Hormona:** Sustancia química producida por células especiales del cuerpo y que es conducida por el torrente circulatorio hasta otras células cuyas propiedades son modificadas por ella.

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor



## **LAS RAICES DE LA VIDA**

Genes, células y evolución

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5

LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

SALVAT

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**



## **LAS RAICES DE LA VIDA**

Genes, células y evolución

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5  
LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

SMVAT

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**



## **LAS RAICES DE LA VIDA**

Genes, células y evolución

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5

LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

SALVAT

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**



## **LAS RAICES DE LA VIDA**

**Genes, células y evolución**

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5

LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

SALVAT

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**



## **LAS RAICES DE LA VIDA**

**Genes, células y evolución**

**M. HOAGLAND**

¿Cómo empezó la vida? ¿De qué están hechos los genes? ¿Son seres vivos los virus? ¿De qué manera las células de un embrión "deciden" convertirse en neuronas del cerebro o en fibras musculares? Desde la evolución de los genes hasta la naturaleza del cáncer o la controversia sobre las técnicas de recombinación del ADN, el doctor Hoagland esclarece en este libro los misterios de la vida en un lenguaje claro y ameno.

Mahlon B. Hoagland es doctor en medicina por la Universidad de Harvard, y en la actualidad preside la Foundation for Experimental Biology de Worcester (Massachusetts). Es autor de numerosas publicaciones científicas, y ha sido galardonado con la prestigiosa Medalla Franklin "por su contribución al conocimiento de los mecanismos de síntesis de las proteínas y de sus relaciones con la información modificada en el ADN y el ARN".

5

**LAS RAICES DE LA VIDA - M. Hoagland**

**M. HOAGLAND**

# **LAS RAICES DE LA VIDA**

**BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT**